



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

AUTOMATIZACE ŘÍZENÍ AEROPONICKÉHO SYSTÉMU

AUTOMATIC CONTROL OF AEROPONIC SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Šimek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Arm

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Martin Šimek **ID:** 195443

Ročník: 3. **Akademický rok:** 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Automatizace řízení aeroponického systému

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem bakalářské práce je navrhnout, realizovat a odzkoušet automatizované řízení aeroponického systému. Nejprve je potřeba specifikovat požadavky na automatické řízení a rozebrat možnosti demonstrovaného aeroponického systému. Dle rešerše dostupných prostředků pro domácí hobby automatizaci je nutné vytvořit návrh systému z hlediska hardware a software. Funkčnost a vlastností vytvořeného systému se vyhodnotí oproti definované specifikaci na reálném demonstračním příkladu, který bude vytvořen.

1. Proveďte rozbor aeroponických a hydroponických systémů určených k pěstebním účelům (dopad na životní prostředí, finanční náročnost, udržitelnost, dostupnost, stavové veličiny).
2. Specifikujte požadavků na vytvářený automatizovaný aeroponický systém (funkce, pracovní podmínky).
3. Proveďte rešerše dostupných prostředků.
4. Navrhněte hardware a software systému.
5. Realizujte a implementujte systém se všemi periferiemi.
6. Odzkoušejte funkčnosti a vyhodnoťte vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 4. 2. 2019

Termín odevzdání: 20. 5. 2019

Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou aeroponických systémů a jejich automatizace. Mezi hlavní prekvizity navrženého systému patří automatická regulace pH a EC pěstebního roztoku, která bude docílena dávkováním hnojiv a kyselin/zásad pomocí peristaltických čerpadel. Pěstební prostor systému bude disponovat automatickou regulací teploty a vzdušné vlhkosti. Spojitou regulaci teploty bude zajišťovat topný článek řízený embedded systémem a nespojitá regulace vlhkosti bude zprostředkována za pomoci ultrazvukového mlhovače. Cílem celé práce je tedy sestavit funkční model aeroponického systému který bude za minimálního zásahu lidského faktoru udržovat ideální pěstební podmínky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aeroponie, pH, EC, Raspberry Pi, Arduino

ABSTRACT

This thesis is focused on aeroponic system problems and automation. One of the main features of the system is automatic regulation of pH and EC of the nutrient solution which will be achieved by dispensing fertilizers and acids/alkalis with peristaltic pumps. Growing area of the system will feature automatic regulation of temperature and humidity. Regulation of temperature will be provided by heating element which is controlled by embedded system. Regulation of humidity will be provided by ultrasonic fogger. The aim of this thesis is to build a functioning model of aeroponic system which will be able to sustain ideal growing conditions with minimal human interference.

KEYWORDS

Aeroponics, pH, EC, Raspberry Pi, Arduino

ŠIMEK, Martin. *Automatizace řízení aeroponického systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí bakalářské práce Jakub Arm.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma automatizace řízení aeroponického systému jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových, a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Armovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	1
1 ALTERNATIVNÍ METODY PĚSTOVÁNÍ	2
1.1 Hydroponie	2
1.1.1 Pasivní systém (Kratky)	3
1.1.2 Knotový systém	4
1.1.3 DWC (Deep Water Culture)	5
1.1.4 Ebb & Flow	6
1.1.5 Drip	7
1.1.6 NFT (Nutrient Film Technique)	8
1.1.7 Využití	9
1.2 Aeroponie	10
1.2.1 LPA (Low Pressure Aeroponics)	11
1.2.2 HPA (High Pressure Aeroponics)	12
1.2.3 Ultrazvukový systém	13
1.2.4 Využití	14
1.3 Srovnání	15
1.4 Ideální podmínky pěstování	17
1.4.1 Spektrum záření	17
1.4.2 Živiny	18
1.4.3 Teplota a vzdušná vlhkost	19
1.4.4 pH	20
1.4.5 EC (Konduktivita roztoku)	21
1.4.6 Ostatní	22
1.5 Dostupné systémy a periferie	23
1.5.1 General Hydroponics – AeroFlo	23
1.5.2 General Hydroponics – Aerofarm	23
1.5.3 Atami – Wilma	24
1.5.4 NFT- Multi Duct	24
1.5.5 BlueLab – pH Controller	25
1.5.6 Cloudponics – GroControl	25
2 NÁVRH A REALIZACE AEROPONICKÉHO SYSTÉMU	26
2.1 Konstrukční část	28
2.2 Řídicí jednotka systému	29
2.3 Blokové schéma systému	30
2.4 Vstupní a výstupní periferie	31
2.4.1 Membránové čerpadlo	31
2.4.2 Ponorné čerpadlo	32
2.4.3 Elektromagnetický ventil	33

2.4.4	Snímač hladiny	34
2.4.5	Čidlo teploty a vzdušné vlhkosti	35
2.4.6	Topný člen	36
2.4.7	Zvlhčovač vzduchu	37
2.4.8	Regulátor pH a EC	38
2.4.9	Relé modul	41
2.4.10	MOSFET PWM modul	42
2.4.11	Obrazovka	42
2.5	Návrh regulátoru pH a EC	43
2.5.1	Řídicí jednotka	43
2.5.2	Měření pH	44
2.5.3	Měření EC	45
2.5.4	Návrh snímače EC	47
2.5.5	Komunikace	48
2.6	Návrh regulátoru teploty	50
2.6.1	Přechodová charakteristika systému	50
2.6.2	Identifikace soustavy	52
2.6.3	Návrh PID regulátoru	57
2.7	Dílčí procesy systému	59
2.7.1	Čtení hodnot z DHT21	59
2.7.2	ON/OFF Regulace vlhkosti	60
2.7.3	PID Regulace teploty	60
2.7.4	Regulace pH a EC	61
2.7.5	Spouštění čerpadla	61
2.8	Software a programování	62
2.8.1	Visual Studio 2017	62
2.8.2	Qt Creator	63
2.8.3	Arduino IDE	63
2.9	Uživatelské rozhraní	64
2.9.1	Úvodní obrazovka	64
2.9.2	Sekce stav systému	65
2.9.3	Sekce historie hodnot	66
2.9.4	Sekce nastavení	67
2.10	Funkčnost a chybovost systému	68
2.11	Energetická náročnost systému	68
2.12	Finanční zhodnocení systému	69
3	ZÁVĚR	70
	LITERATURA	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73

SEZNAM TABULEK	75
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	76
Seznam příloh.....	77

ÚVOD

Pěstování rostlin v půdě patří již od nepaměti k jednomu z hlavních udržitelných zdrojů potravin pro lidskou populaci. Vlivem průmyslového zemědělství se však tato metoda pěstování stala velkou zátěží pro ekosystém naší planety. Na vině je především velká spotřeba vody používaná na zavlažování a nadměrné využívání chemických hnojiv a postřiků, které znečišťují životního prostředí. Toto znečištění se projevuje zejména v podobě postupného znehodnocování orné půdy a kontaminaci podzemních vod. V poslední době je s problémem nadměrného používáním insekticidů a pesticidů spojováno také téma rychlého vymírání hmyzu.

Jednou z nejvyspělejších a nejpokrokovějších alternativních metod pěstování je aeroponie. Tento způsob pěstování je specifický tím, že nepoužívá žádné pěstební médium a výživa rostliny je zprostředkována pomocí aerosolu obsahujícího směs vody a vhodných hnojiv. Kořenová část rostliny je tedy volně umístěna v uzavřené části systému, kde je pomocí rozprašovacích trysek vytvářena mlha obsahující živiny.

Při pěstování rostlin v aeroponickém systému je kladen největší důraz na udržování ideálních hodnot parametrů pěstebního roztoku, z kterého je následně vytvářen aerosol. Mezi tyto parametry bezpochyby patří pH, konduktivita (EC) a teplota. Tyto parametry je zapotřebí neustále kontrolovat a upravovat, jelikož jejich vychýlení z přípustných hodnot by mohlo znamenat poškození nebo úhyn rostlin. Z těchto důvodů je tedy vhodné celý proces kontroly a úpravy hodnot parametrů automatizovat. Tím bude jednak ušetřen čas pěstitele, a jednak bude docíleno ideálních hodnot parametrů téměř v každém časovém okamžiku.

Pro navrhovaný aeroponický systém byl zvolen přístup vysokotlaké aeroponie zejména kvůli její vysoké efektivitě. Při sestavování návrhu tohoto systému bude dbáno na následující požadavky:

- Modulárnost a mobilita celého systému
- Uzavřený pěstební prostor
- Regulace teploty a vlhkosti v pěstebním prostoru
- Automatické doplňování hladiny živného roztoku
- Promíchávání živného roztoku
- Samostatný regulátor pH a EC živného roztoku
- Ovládání celého rozhraní pomocí dotykové obrazovky

1 ALTERNATIVNÍ METODY PĚSTOVÁNÍ

Tyto metody jsou většinou založeny na poznatcích z běžného půdního pěstování. Z důvodu problémů týkajících se běžného polního pěstování je u těchto metod kladen důraz na udržitelnost, minimální ekologickou zatížitelnost a rychlou a kvalitní produkci rostlin. Tyto metody jsou určeny jak pro malé aplikace v rámci osobního použití, tak i pro velkoplošné pěstování, které se většinou užívá tam, kde je klasické půdní pěstování nemožné nebo ekonomicky nevýhodné (velká města aj.).

1.1 Hydroponie

Hydroponie je metoda pěstování, při které je kořenový systém rostliny umístěn do živného roztoku, který se nachází ve světle nepropustné nádobě. U této metody tedy není potřeba žádná půda, která by sloužila jako úložiště živin, jelikož veškeré potřebné živiny obsahuje roztok, který je přímo dostupný kořenovému systému. Takový roztok může být tvořen například vodou smíchanou s příslušnými hnojivy nebo různými nálevy z organických materiálů (listy kopřiv aj.).

Pro uchycení rostlin v takovémto systému se využívá pěstební média, které bývá umístěno buď v pěstební nádobě, nebo v hydroponickém košíčku. U pěstební média je důležitým parametrem jeho stálost a nasákavost. Dle těchto parametrů se dále rozhoduje o typu pěstební média použitého pro určený hydroponický systém. V hydroponickém pěstování rozeznáváme tyto hlavní pěstební média:

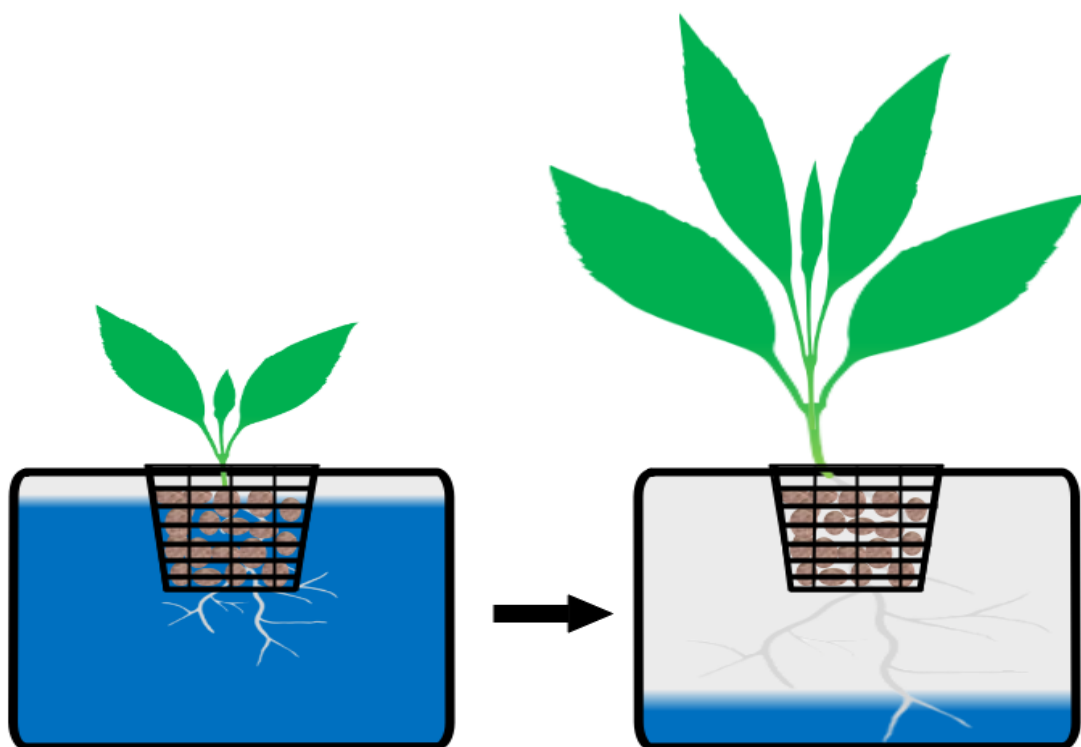
- Keramzit – Jedná se o jílové pelety expandované při vysokých teplotách. Je to stálý materiál bez živin s malou nasákavostí a neutrálním pH. Využívá se u systémů, v nichž je kořenový systém rostlin v neustálém kontaktu s živným roztokem (DWC, NFT aj.).
- Kokosové vlákno – Jedná se o materiál, který vzniká jako odpad při zpracování kokosových ořechů. Tento materiál lze použít pouze pro omezený počet pěstebních cyklů, poté je nutné jej vyměnit. Hlavní výhodou kokosových vláken je výskyt houby trichoderma, která má příznivý vliv na vývoj a ochranu kořenového systému.
- Rockwool – Neboli minerální vata, která vzniká roztavením hornin čediče. Díky jeho odolnosti a univerzálnímu použití se jedná o nejrozšířenější pěstební médium v oblasti hydroponického pěstování.

1.1.1 Pasivní systém (Kratky)

Jedná se o nejprimitivnější formu hydroponického systému. Rostlina je umístěna do nádrže s živným roztokem tak, aby byla vrchní část kořenového systému přístupná vzduchu. S postupem času, jak se rostlina rozrůstá, tak hladina živného roztoku klesá, čímž se zvětšuje volný okysličený prostor kolem kořenového systému rostliny. Tímto způsobem je tedy zajištěn rovnoměrný přísun kyslíku ke kořenům po celou dobu pěstebního cyklu.

U těchto systému je třeba tvar nádoby a poměr živin v roztoku přizpůsobit nárokům pěstované rostliny. Jsou vhodné především pro nenáročné rostliny s krátkou dobou pěstebního cyklu (saláty, bylinky aj.). Vlivem malého okysličení živného roztoku jsou tyto systémy náchylné na znečištění a různé choroby. Nízké okysličení roztoku má též nepříznivý vliv na vývoj a rychlost růstu dané rostliny. V odborné literatuře se s tímto systémem můžeme setkat pod označením „Kratky“.

Hydroponický pasivní systém (Kratky) je znázorněn na obrázku 1.1. V pravé části tohoto obrázku je uveden systém s rostlinou na začátku pěstebního cyklu a v levé části je vyobrazen tentýž systém s rostlinou blížící se ke konci pěstebního cyklu.



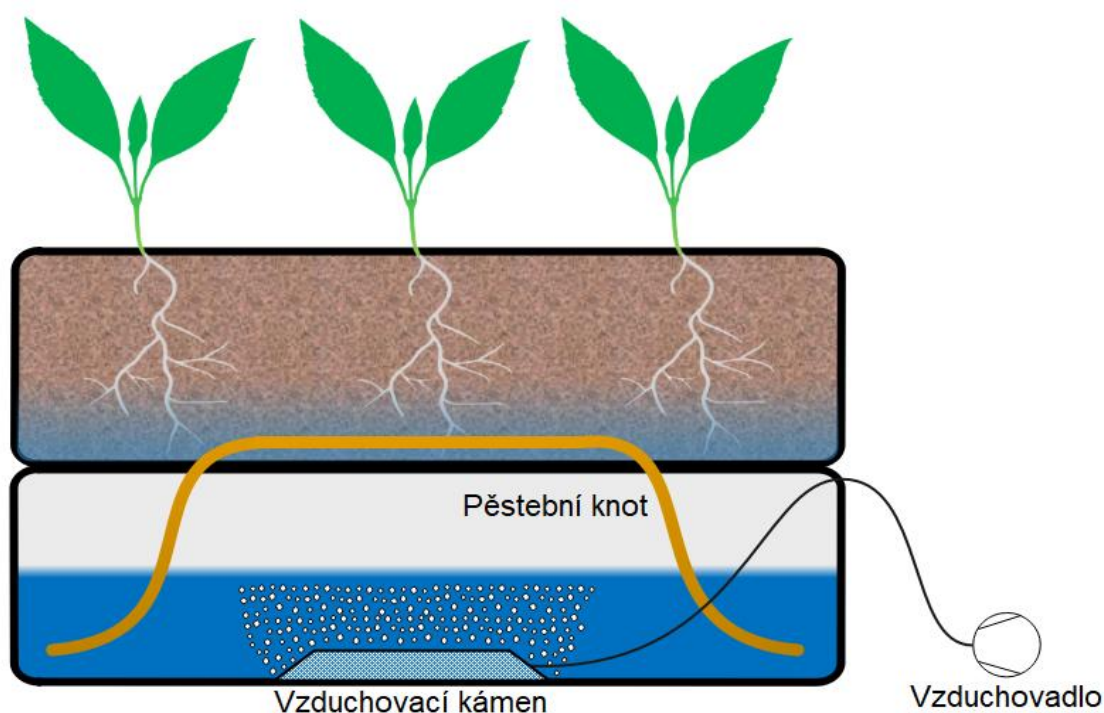
Obrázek 1.1: Pasivní systém (Kratky)

1.1.2 Knotový systém

Poměrně rozšířený typ hydroponického systému, který pro přísun živného roztoku ke kořenové části využívá pěstebních knotů pracujících na kapilárním efektu. Tyto knoty jsou jedním koncem ponořeny do živného roztoku a druhým koncem zavedeny do pěstebního média (kokosová rašelina, perlit aj.). Díky neustálému vlhčení pěstebního média není zajištěn dostatečný přístup kyslíku ke kořenům rostliny, což nepříznivě ovlivňuje jejich vývoj. Samotný systém je díky absenci akčních členů řazený mezi pasivní hydroponické systémy, ale je vhodné jej doplnit o vzduchovací kámen se vzduchovadlem, který zajistí promíchávání a okysličení živného roztoku.

Tento typ systému se opět musí přizpůsobit nárokům pěstované komodity, jelikož se může stát, že rostlina spotřebovává větší množství roztoku, než je pěstební knot schopen dodávat, a v takovém případě dochází k postupnému vysychání pěstebního média, které může vyústit až v úhyn rostliny. U tohoto typu systému je důležité soustavně kontrolovat a doplňovat hladinu živného roztoku, jejíž úbytek závisí na okolním prostředí pěstované rostliny. S tímto systémem se můžeme běžně setkat v podobě samozavlažovacích truhlíků.

Hydroponický knotový systém je znázorněn na obrázku 1.2.



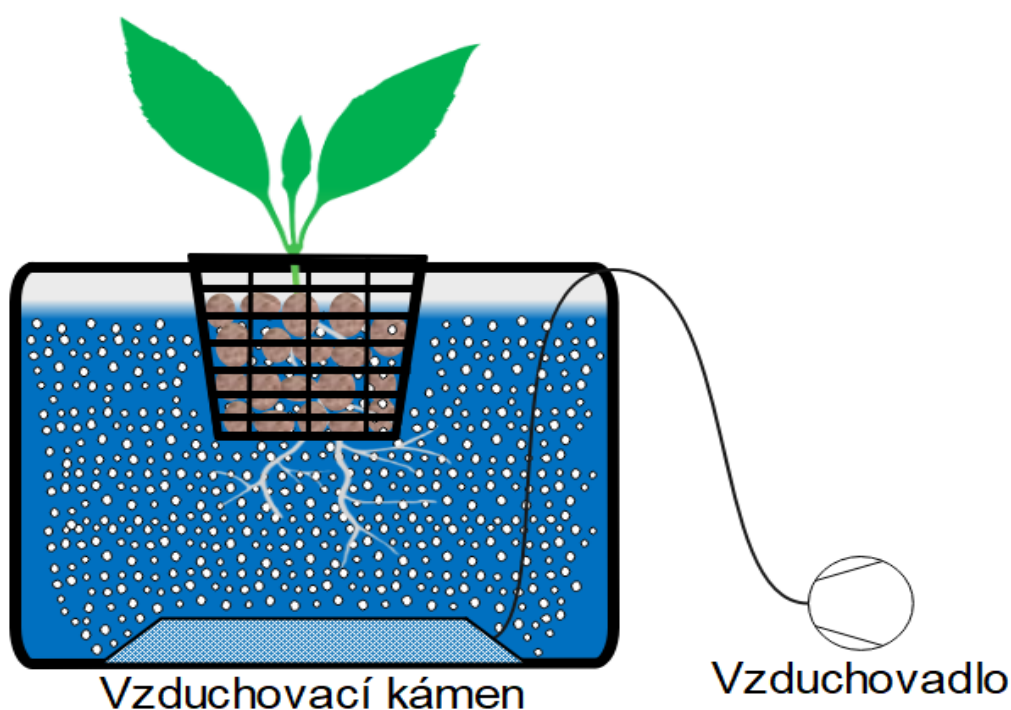
Obrázek 1.2: Knotový systém

1.1.3 DWC (Deep Water Culture)

Jedná se o nejjednodušší aktivní hydroponický systém. Jak již napovídá název systému, tak většina kořenové části rostliny je po celou dobu pěstebního cyklu ponořena v živném roztoku, jenž je okysličován pomocí vzduchovacího kamene a vzduchovadla. Pro zakotvení rostliny se nejčastěji využívají hydroponické košíčky naplněné keramzitem, který díky své pórovitosti a hrubosti zajišťuje dostatečný přísun okysličených bublinek ke kořenům. Dále může být pro zakotvení rostliny použita polystyrenová platforma, která udrží vrchní část rostliny nad vodní hladinou a nijak neomezuje prostor kořenového systému.

Tento typ systému je tak, jako pasivní systém (Kratky), určený především pro nenáročné rostliny s kratším pěstebním cyklem (saláty, bylinky aj.). Jelikož je přístup kyslíku ke kořenovému systému závislý pouze na aktivním vzduchovadle, v případě výpadku elektrické energie nebo při poruše tohoto vzduchovadla dochází během desítek minut k úhynu rostliny. S tímto systémem se můžeme setkat pod označením „bubbler“.

Hydroponický DWC systém je znázorněn na obrázku 1.3.



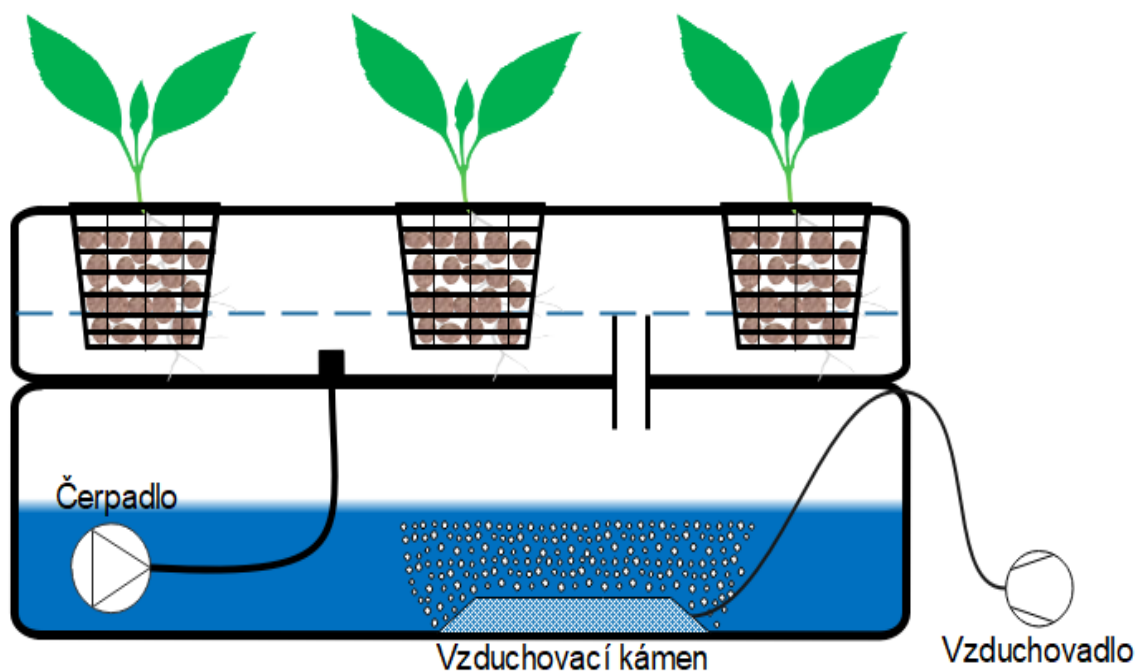
Obrázek 1.3: Systém DWC

1.1.4 Ebb & Flow

Tento systém využívá k distribuci živného roztoku ke kořenům rostliny napouštěcích a vypouštěcích cyklů. Cykly bývají většinou řízeny časovačem. Při napouštěcím cyklu je časovač sepnut, čímž se aktivuje odstředivé čerpadlo, které započne přepouštět živný roztok do pěstební nádoby. Jakmile hladina roztoku v pěstební nádrži dosáhne úrovně přepadu, roztok se opět vrací do nádoby s čerpadlem. Tento cyklus trvá do té doby, dokud neuplyne interval sepnutého stavu časovače. Jakmile se stane čerpadlo neaktivním tak započíná vypouštěcí cyklus. V tomto cyklu je živný roztok v pěstební nádobě vlivem gravitační síly navrácen zpět přes potrubí čerpadla do rezervoáru s roztokem.

Pomocí časovače lze nastavit dobu napouštěcího cyklu tak, aby byl zajištěn optimální přísun živného roztoku pro daný typ pěstované komodity. Optimální doba napouštěcího cyklu je také závislá na použitém typu pěstebního média, zejména na jeho nasákavosti. Tyto systémy jsou vzhledem k jejich údržbě poměrně nenáročné, je ale nutné u nich provádět rutinní kontrolu akčních členů, zejména čerpadla, na němž je závislý přívod živného roztoku ke kořenům rostliny. S tímto systémem se můžeme setkat v podobě napouštěcích stolů, které se hojně využívají v zahradnických komplexech.

Hydroponický DWC systém je znázorněn na obrázku 1.4. Modrým čárkováním je zde označena vodní hladina v případě sepnutého čerpadla.



Obrázek 1.4: Systém Ebb&Flow

1.1.5 Drip

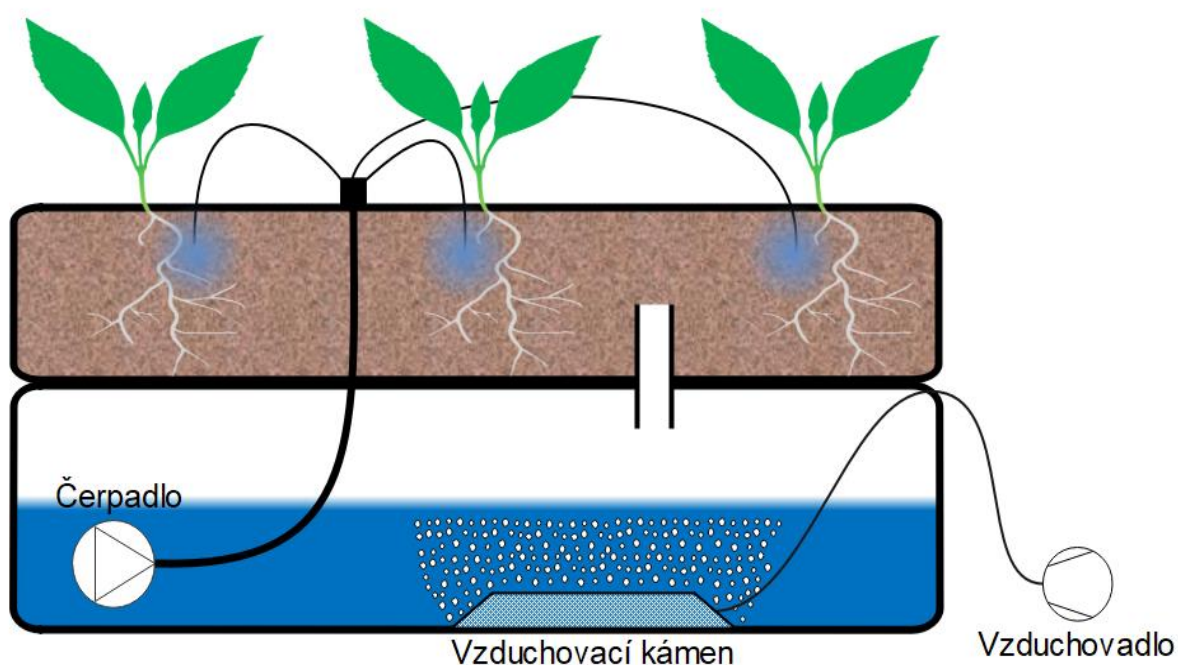
Jedná se o variantu klasické kapénkové závlahy. Systém je rozdělen na pěstební nádobu a na rezervoár s živným roztokem, ve kterém bývá umístěno čerpadlo spolu se vzduchovacím kamenem. Pomocí čerpadla je živný roztok přiváděn do rozvodného systému kapilár, z kterého pak jednotlivé kapiláry směřují ke kořenovým systémům příslušných rostlin.

Dávkování živného roztoku čerpadlem bývá většinou řízeno časovačem. U těchto systému rozeznáváme dva druhy:

- Oběhové – roztok se vrací zpět do rezervoáru pomocí přepadu
- Neoběhové – roztok je spotřebován rostlinou v pěstebním médiu

U oběhového systému je zajištěn lepší přístup kyslíku ke kořenům rostliny z důvodu rychlejšího odvodu živného roztoku z pěstební nádoby zpět do rezervoáru. Vlivem návratu živného roztoku zpět do rezervoáru je zapříčiněna prudká změna parametrů pH a EC, které se musí následně zkorigovat. Neoběhové systémy jsou naopak náchylnější k převlhčení, ale jelikož se živný roztok nevrací zpět do rezervoáru, tak se jeho hodnoty parametrů pH a EC takřka nemění. Nevýhodou obou těchto systému je časté ucpávání kapilár, jež zamezí přívod živného roztoku ke kořenům rostliny.

Hydroponický Drip systém je znázorněn na obrázku 1.5.



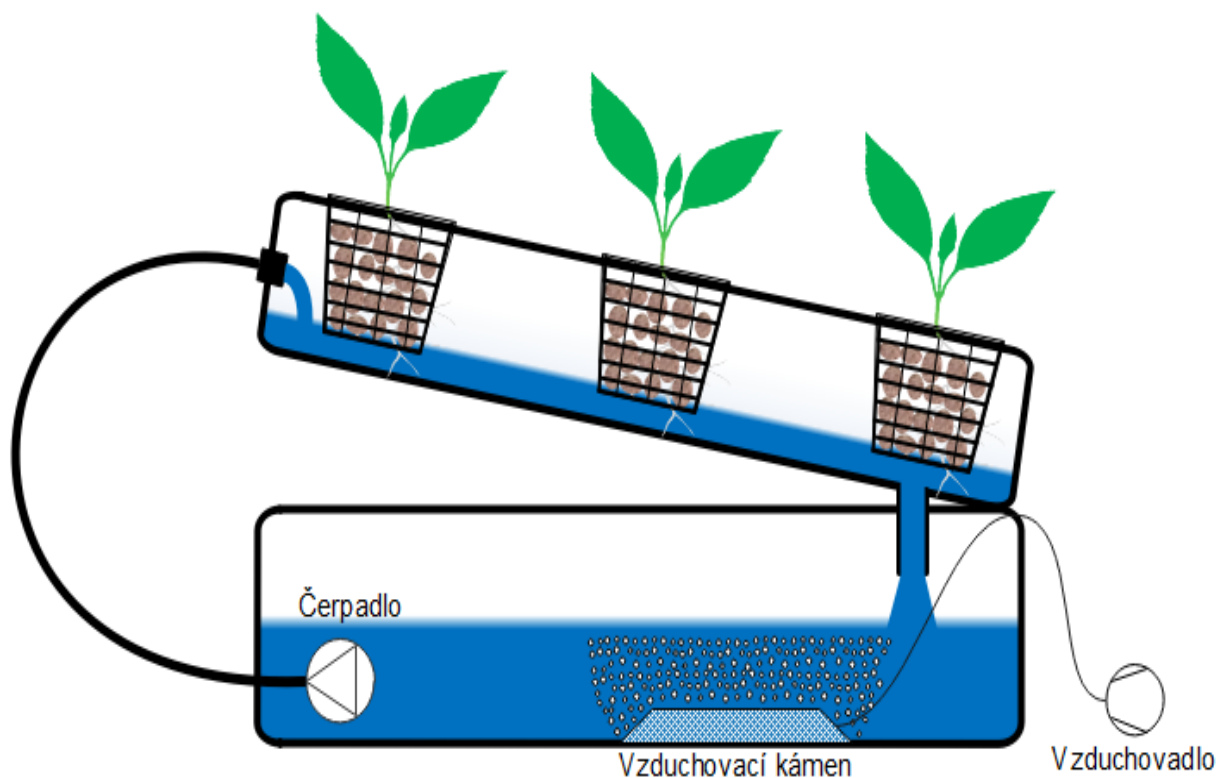
Obrázek 1.5: Drip systém

1.1.6 NFT (Nutrient Film Technique)

Tento typ systému se řadí mezi nejpoužívanější v oboru hydroponického pěstování. Jedná se o cirkulační systém. Čerpadlo je tedy v tomto systému neustále sepnuto a v nakloněné pěstební nádobě vytváří kontinuální vrstvičku živného roztoku, který je pomocí přepadu na konci pěstební nádrže navrácen zpět do rezervoáru.

U těchto systémů je důležité nastavit náklon pěstební nádoby a průtok čerpadla tak, aby byla zajištěna tenká vrstvička živného roztoku, která nebude zamezovat přístupu kyslíku ke kořenům, a zároveň bude zajišťovat optimální přísun živného roztoku ke kořenové části rostliny. Jako pěstební médium se většinou používá rockwool nebo keramzit z důvodu jejich malé nasákavosti. V případě poruchy čerpadla tenká vrstvička živného roztoku zanikne a dochází k rychlému vysychání kořenů, které může vést až k úhynu rostliny.

Hydroponický NFT systém je znázorněn na obrázku 1.6.

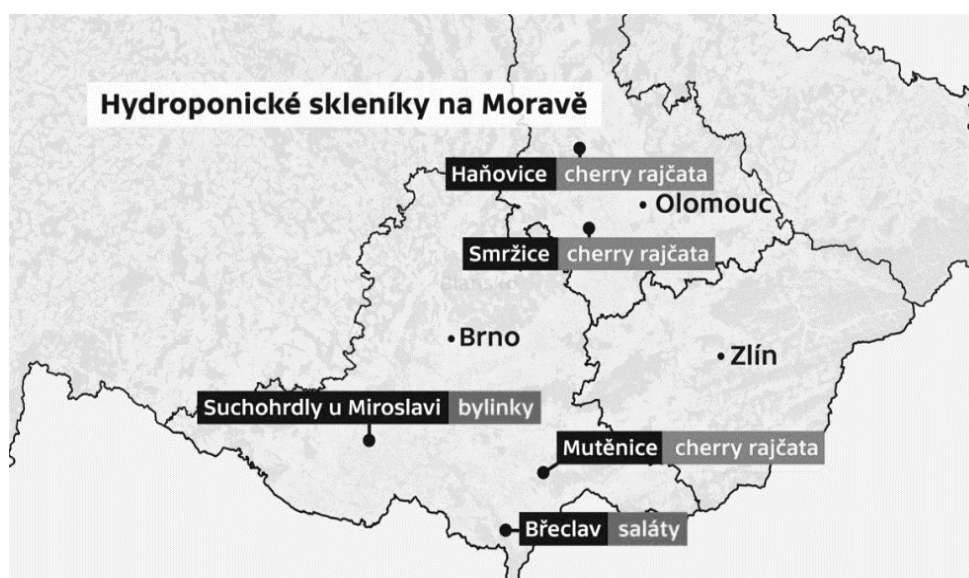


Obrázek 1.6: NFT systém

1.1.7 Využití

Téma hydroponického pěstování je v dnešní době poměrně rozšířené a to hlavně z důvodu jeho nesporných výhod oproti klasickému půdnímu pěstování. Jedním z hlavních důvodů, proč se současné zemědělství zabývá touto metodou pěstování je, že se jedná o výnosný udržitelný zdroj potravin s minimální ekologickou náročností (znečištění, spotřeba vody) a vysokou odolností vůči chorobám, který lze provozovat celoročně. V současnosti se kvůli celoročnímu pěstování hydroponické systémy instalují buď do skleníků, nebo do budov, v nichž je zajištěn umělý osvit rostlin.

V České republice na Moravě je v dnešní době vystavěno již pět takovýchto hydroponických skleníků, přičemž tři z nich slouží k produkci rajčat. Produkce takového skleníku o rozloze 5 hektarů je zhruba 6 tun rajčat denně [1]. Většina těchto skleníků využívá hydroponický systém typu drip spolu s kokosovými rohožemi jako pěstebním médiem.



Obrázek 1.7: Hydroponické skleníky na Moravě[1]

1.2 Aeroponie

Aeroponie je metoda pěstování rostlin, která byla vystavěna na poznatcích z hydroponického pěstování. V současné době se jedná o jednu z nejnáročnějších a nejefektivnějších metod určených k pěstování rostlin. Tato metoda se oproti hydroponickému přístupu zásadně liší tím, že kořenový systém již není v přímém kontaktu s živným roztokem, ale pouze s aerosolem, jenž je tvořen směsí vzduchu a živného roztoku. Takový aerosol může být vytvořen různými způsoby, nejzákladnější z nich jsou:

- Ultrazvukový mlhovač
- Mlhovací trysky spolu s vysokotlakým čerpadlem
- Rozprašovací trysky spolu s nízkotlakým čerpadlem

Z hlediska průměru kapiček aerosolu d dělíme aeroponické systémy do tří následujících skupin [2]:

- $d < 10 \mu\text{m}$ – ultrazvukové aeroponické systémy
- $d \approx 50 \mu\text{m}$ – vysokotlaké aeroponické systémy
- $d \gg 100 \mu\text{m}$ – nízkotlaké aeroponické systémy

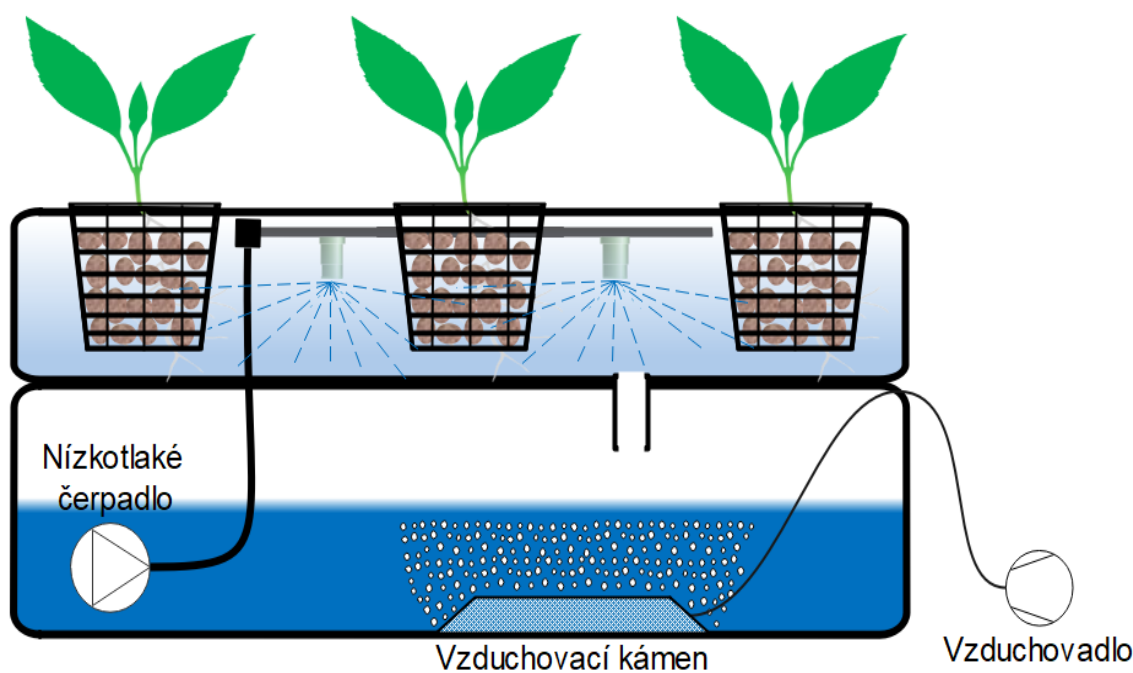
Tyto systémy jsou svou konstrukcí poměrně složité. S tím se také pojí jejich častá údržba, která spočívá zejména v čištění mlhovacích trysek, jež se postupem času zanáší usazeninami minerálních hnojiv obsažených v živném roztoku. Složitost těchto systému se také odráží na jejich vysoké ceně.

1.2.1 LPA (Low Pressure Aeroponics)

Jedná se o nejméně efektivní aeroponický typ systému. Pomocí nízkotlakého čerpadla řízeného časovačem je přiveden živný roztok do rozprašovacích trysek, které následně vytváří aerosol. Tento aerosol je dále zachycován kořenovým systémem rostliny, který ale není schopen tak velké kapičky udržet, a proto po něm stékají dolů a vytváří kolem něho téměř souvislou vrstvu živného roztoku. Jedná se tedy spíše o hybridní systém aeroponie a hydroponie.

U těchto systémů je vhodné oddělit pěstební nádobu a rezervoár s živným roztokem tak, aby byl přebytečný živný roztok z pěstební nádrže odváděn pomocí přepadu zpět do rezervoáru. Poté je totiž umožněno měřit hodnoty parametrů pH a EC přímo u přepadu do rezervoáru s živným roztokem. Pokud tedy známe hodnotu EC roztoku před spuštěním mlhovacích trysek, tak spolu s hodnotou EC přebytečného roztoku lze dopočítat ideální poměr živin v rezervoáru. S tímto systémem se můžeme setkat pod označením „Pseudo-Aero“. Tento typ systému je využíván u většiny komerčních aeroponických zařízení.

Aeroponický LPA systém je znázorněn na obrázku 1.8.



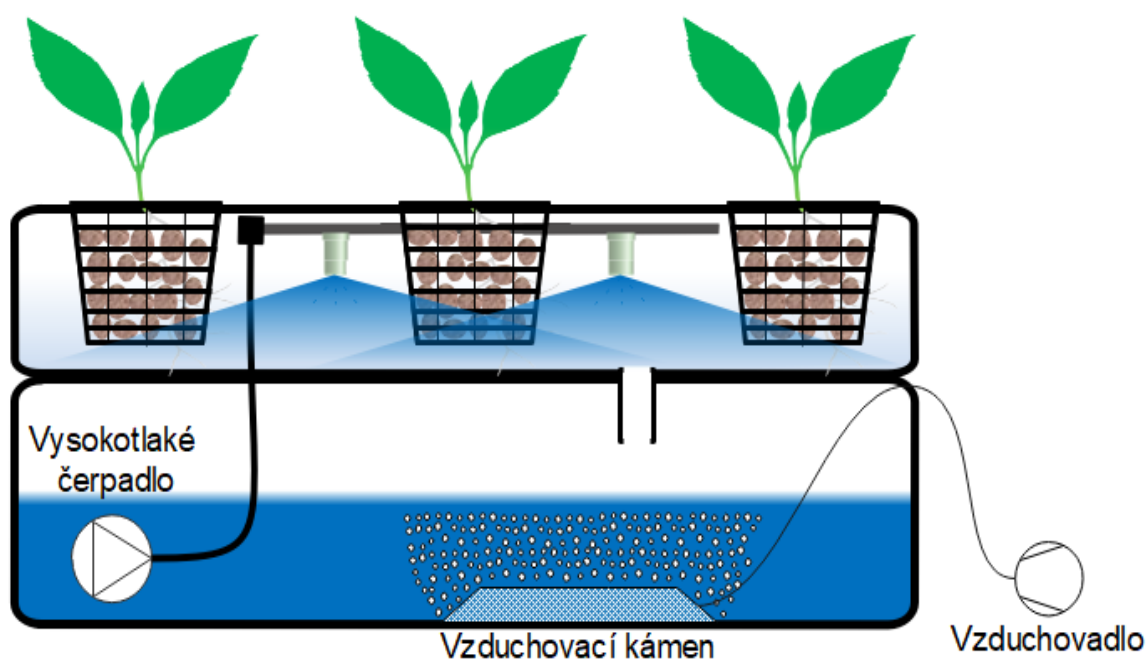
Obrázek 1.8: LPA systém

1.2.2 HPA (High Pressure Aeroponics)

Vysokotlaký aeroponický systém je považovaný za standard aeroponického pěstování. Aerosol je zde vytvářen pod vysokým tlakem živného roztoku a to nejčastěji pomocí membránových čerpadel a mlhovacích trysek. Díky optimální velikosti kapiček aerosolu je zajištěno to, že kapičky po kořenech nestékají, ale usazují se na nich a dávají tak kořenovému systému optimální přístup ke kyslíku.

U těchto systémů se může využít pěstební médium, ale mnohem častěji se setkáme s neoprenovými krytkami, které slouží jednak k zakotvení rostlin a poté ke kompletnímu uzavření pěstební nádoby, z které již nemůže aerosol přes otvory pro rostliny unikat ven. Interval spínání čerpadla pomocí časovače je nutné nastavit tak, aby kořenový systém příliš nezasychal, ale zároveň aby nedocházelo k převlhčení a tím pádem zániku kapiček na kořenech, z nichž by se stal souvislý povlak. S tímto systémem se můžeme setkat pod označením „TAG“.

Aeroponický HPA systém je znázorněn na obrázku 1.9.



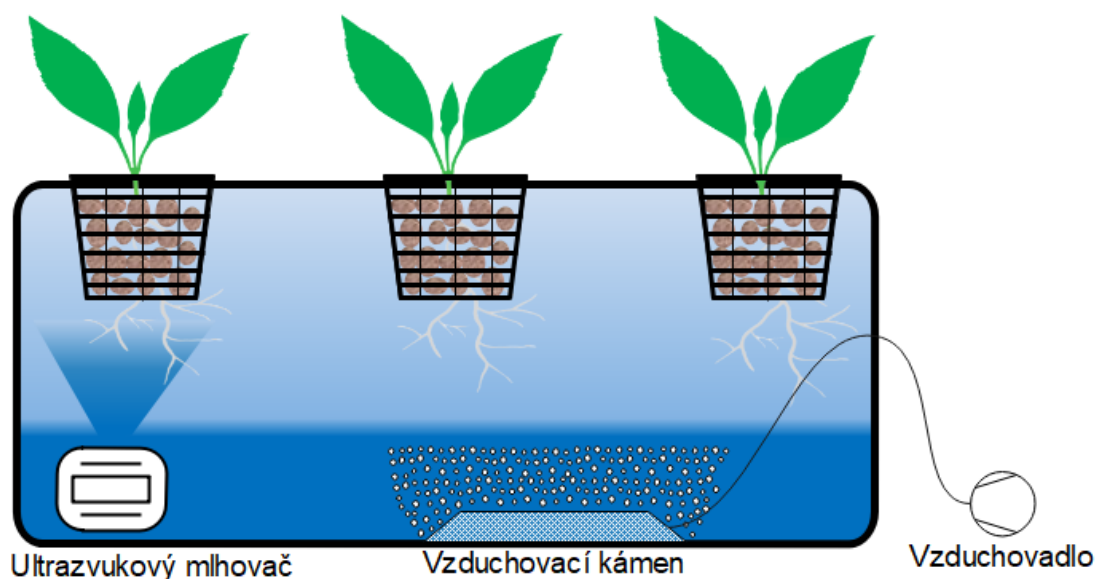
Obrázek 1.9: HPA systém

1.2.3 Ultrazvukový systém

Jedná se o aeroponický systém s nejmenším průměrem kapiček aerosolu. Takovýto aerosol je vytvářen pomocí ultrazvukových mlhovačů, které se umísťují přímo do rezervoáru s živným roztokem. Hlavní část těchto mlhovačů je tvořena mechanickým rezonančním členem, jenž je spojen s keramickou membránou, která kmitá s rezonanční frekvencí vody, a tím je voda odpařována do prostoru. Kvůli malému průměru kapiček aerosolu dochází k nadměrné tvorbě kořenových vlásku, které jsou schopné tak malý průměr kapiček aerosolu zachytit. Díky této nadměrné tvorbě kořenových vlásku dochází ke špatnému vývoji postranních kořenů, které jsou nezbytné pro optimální růst rostliny.

Z hlediska údržby je u těchto systémů vyžadována častá kontrola keramických membrán ultrazvukových mlhovačů. V případě zanesení této membrány vlivem usazenin minerálních hnojiv může být činnost tohoto mlhovače omezena nebo zastavena. S tímto systémem se můžeme setkat pod označením „Fogponic“.

Aeroponický ultrazvukový systém je znázorněn na obrázku 1.10.



Obrázek 1.10: Aeroponický ultrazvukový systém

1.2.4 Využití

V dnešní době najdou aeroponické systémy uplatnění zejména v produkci listové zeleniny a různých druhů bylinek. V případě velkoplošného pěstování se tyto systémy umísťují do zastřešených objektů (nejčastěji výrobní haly, sklady aj.), ve kterých je instalovaný umělý osvit. Díky dostatečné výšce těchto objektů je možné tyto systémy řadit vertikálně, čímž je dosaženo efektivního využití dostupného místa.



Obrázek 1.11: Výrobní hala osazená aeroponickými systémy [3]

Díky účinnosti aeroponického pěstování se o tyto systémy zajímá i národní úřad pro letectví a kosmonautiku NASA. Ten ve svém vesmírném programu využívá aeroponii jako jednu z možností udržitelného zdroje potravin ve vesmíru.



Obrázek 1.12: Nafukovací aeroponický systém pro vesmírné použití [4]

1.3 Srovnání

V následující tabulce je uvedeno srovnání všech uvedených typů systémů aeroponického a hydroponického pěstování:

Tabulka 1.1: Srovnání hydroponických a aeroponických systémů

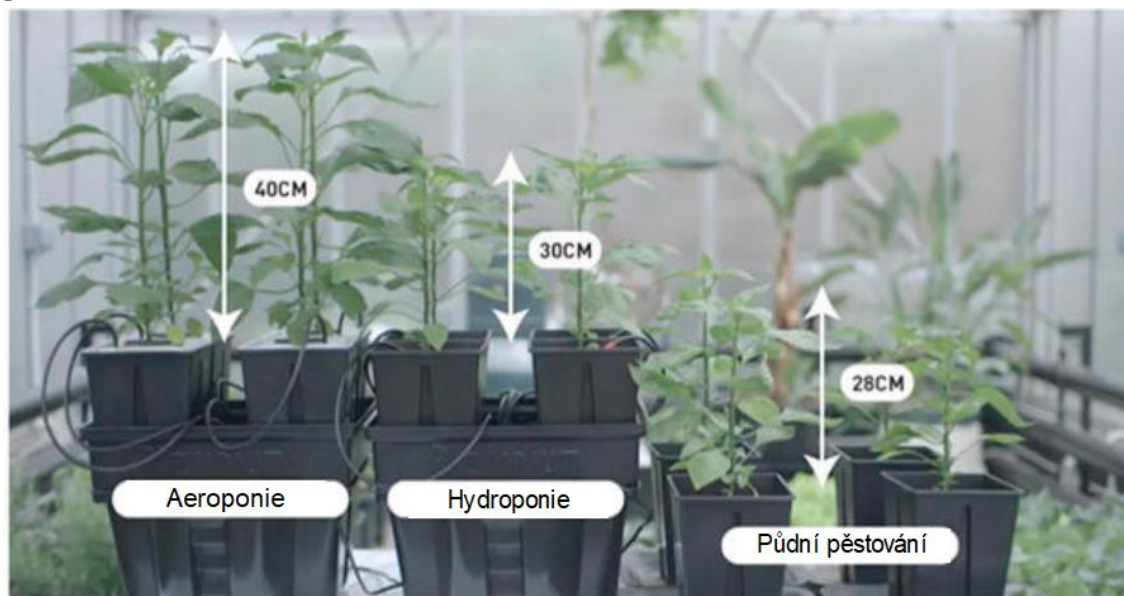
Typ systému	Výhody	Nevýhody
Pasivní	<ul style="list-style-type: none"> - Nejjednodušší forma hydroponie - Levný a dostupný - Nenáročný na údržbu - Nevyžaduje žádné akční členy (čerpadla, vzduchovadla aj.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Malý přístup kyslíku ke kořenům - Náchylný na přehnojení - Pomalý vývoj rostliny - Rychlé znečištění živného roztoku
Knotový	<ul style="list-style-type: none"> - Nízké nároky na údržbu - Nevyžaduje čerpadlo - Jednoduchý a dostupný 	<ul style="list-style-type: none"> - Spotřeba většího množství pěstebního média - Malý přístup kyslíku ke kořenům - Pomalý vývoj rostliny
DWC	<ul style="list-style-type: none"> - Nejjednodušší forma aktivní hydroponie - Není nutné použití čerpadla - Spolehlivý 	<ul style="list-style-type: none"> - Častá výměna živného roztoku - Pomalý vývoj rostliny - Náchylný k znečištění (řasy, plísně aj.)
Ebb & Flow	<ul style="list-style-type: none"> - Nízké nároky na údržbu - Nastavení napouštěcích cyklů dle potřeby - Cirkulace živného roztoku 	<ul style="list-style-type: none"> - Technické závady (čerpadlo, vzduchovalo, časovač) - Náchylný k znečištění (řasy, plísně aj.)
Drip	<ul style="list-style-type: none"> - Dostatečný přísun kyslíku ke kořenům - Dostupný 	<ul style="list-style-type: none"> - Zanášení rozvodných kapilár - Spotřeba většího množství pěstebního média
NFT	<ul style="list-style-type: none"> - Cirkulace živného roztoku - Efektivní využití prostoru 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimální nastavení systému (náklon pěstební nádoby aj.)
LPA	<ul style="list-style-type: none"> - Nízkotlaké čerpadlo - Levná varianta aeroponie 	<ul style="list-style-type: none"> - Nejméně efektivní forma aeroponie
HPA	<ul style="list-style-type: none"> - Nejefektivnější vstřebávání živin - Optimální přísun kyslíku 	<ul style="list-style-type: none"> - Cena - Ucpávání mlhovacích trysek
Ultrazvukový	<ul style="list-style-type: none"> - Odolný vůči plísním - Optimální pro vegetativní rozmnožování 	<ul style="list-style-type: none"> - Zanášení membrány mlhovače - Nadměrná tvorba kořenových vlásků

Výhody a nevýhody aeroponického pěstování ve srovnání s klasickým půdním pěstováním jsou uvedeny v nadcházející tabulce:

Tabulka 1.2: Srovnání aeroponické metody oproti běžnému půdnímu pěstování

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Menší spotřeba hnojiv a vody (úspora až 98 % vody [5]) • Rychlejší a stabilnější růst rostlin • Šetrnější k životnímu prostředí • Jednoduchá manipulace se systémem • Možnost udržování ideálních hodnot parametrů pěstebního roztoku • Menší riziko napadení chorobami 	<ul style="list-style-type: none"> • Cena systému • Údržba systému • Napájení prvků systému (čerpadlo, elektromagnetické ventily atd.)

Na obrázku 1.13 můžeme vidět srovnání vývoje rostlin pěstovaných za stejných okolních podmínek pomocí aeroponie, hydroponie a klasického půdního pěstování.



Obrázek 1.13: Srovnání rostlin pěstovaných pomocí různých metod [6]

1.4 Ideální podmínky pěstování

V aeroponickém a hydroponickém pěstování jsou kladeny specifické požadavky především na živný roztok. Nároky na okolní podmínky jako je teplota, vzdušná vlhkost a osvětlení jsou téměř shodné s klasickým půdním pěstováním.

1.4.1 Spektrum záření

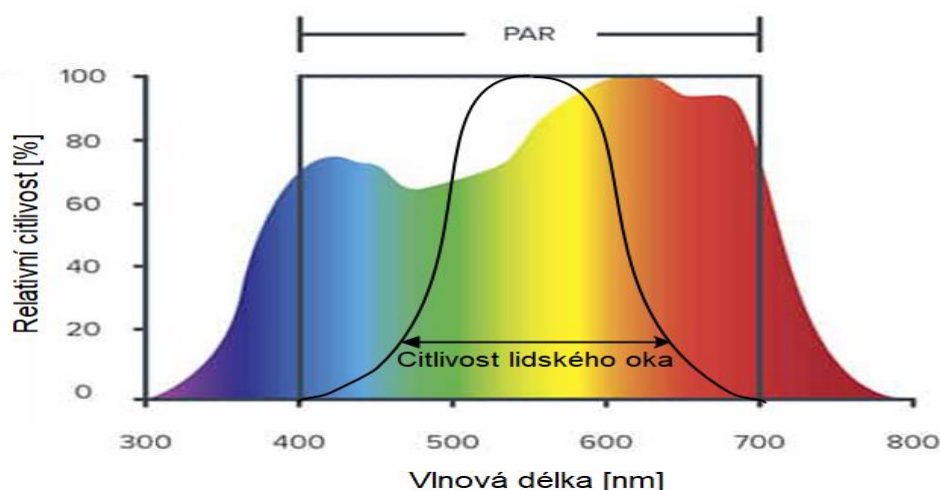
Osvětlení je jeden z nejdůležitějších parametrů při pěstování rostlin, jelikož s ním úzce souvisí průběh chemického procesu zvaný fotosyntéza. Správný průběh fotosyntézy je stěžejní pro optimální vývoj rostliny.

Spektrum slunečního záření prostupující zemskou atmosférou obsahuje především větší část optického záření. Toto optické záření zahrnuje [7]:

- Ultrafialové záření o vlnových délkách 100 až 380 nm
- Viditelné záření o vlnových délkách 380 až 780 nm
- Infračervené záření o vlnových délkách 780 až 1000 nm

Ideální spektrum záření pro pěstování rostlin je definováno jako PAR. Z obrázku 1.14 lze vyčíst, že rostliny nejvíce vnímají odstíny modrého a červeného světla. Barva světla je většinou spojena s určitou fází pěstebního cyklu. Větší poměr modrého osvětlení se nejvíce využívá při fázi růstu a převládající poměr červeného osvětlení je ideální pro fázi květu.

Díky velkému pokroku v oblasti technologií výroby LED osvětlení jsou dnes k dispozici speciální LED čipy, které jsou uzpůsobené tak, aby pokrývaly největší možnou část PAR spektra. Tyto pěstební LED čipy jsou ve srovnání s běžně využívanými sodíkovými výbojkami daleko účinnější, jelikož vyzařují jen potřebné spektrum pro pěstování rostlin.



Obrázek 1.14: Fotosynteticky aktivní záření [8]

1.4.2 Živiny

Ke správnému vývoji potřebují rostliny devět základních makrobiogenních prvků a nejméně osm mikrobiogenních prvků.

Makrobiogenní prvky a formy, ve kterých jsou často přijímány, jsou[9]: uhlík, vodík, kyslík, dusík, síra, fosfor, draslík, vápník, hořčík. Mezi osm základních mikroelementů patří[9]: chlor, železo, bor, mangan, zinek, měď, molybden, kobalt. Mezi nejdůležitější makrobiogenní prvky se řadí dusík, fosfor a draslík. Údaj o poměru těchto prvků je většinou k nalezení na etiketě daného hnojiva pod označením NPK.

V hydroponických a aeroponických systémech není vhodné využívat standartní hnojiva, jelikož se v živném roztoku nenachází žádné mikroorganismy, které by organickou hmotu obsaženou v takových hnojivech rozkládaly na živiny dostupné pro kořenový systém rostliny. Nejběžněji se tedy vyživá hnojiv na minerální bázi, které obsahují anorganické soli potřebných prvků pro pěstování, jež jsou pro rostlinu lehce vstřebatelné.

S organickými hnojivy používanými při hydroponickém pěstování se můžeme setkat v tzv. „bioponii“. Tento druh pěstování se vyznačuje tím, že do živného roztoku jsou přidány živé organismy, které napodobují degradační procesy organické hmoty v půdě.

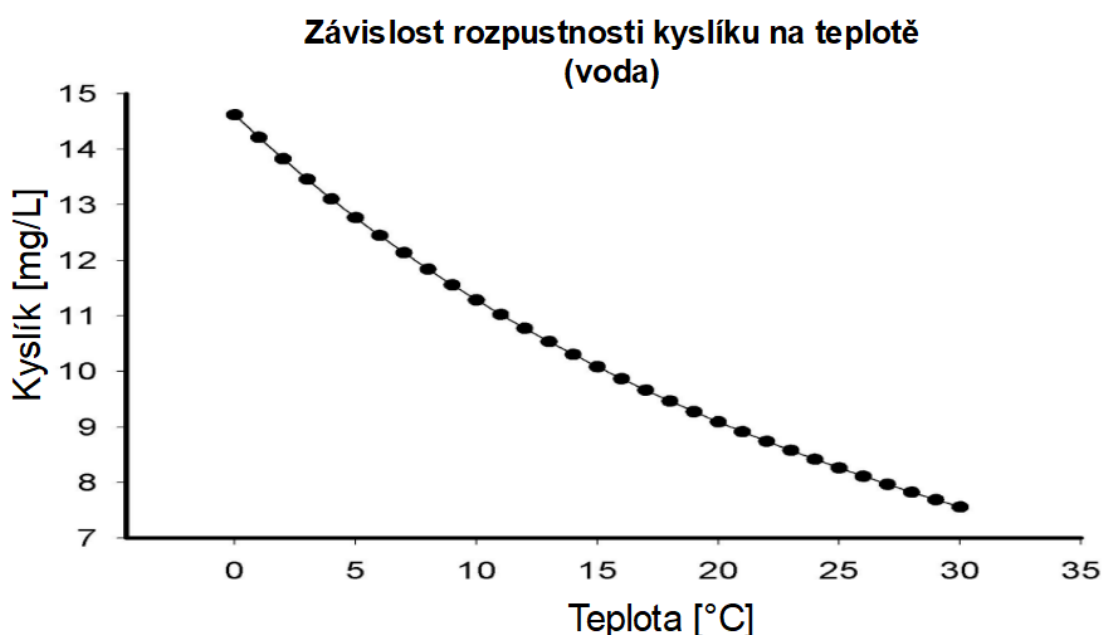
Úroveň rozpuštěných solí v živném roztoku se měří pomocí EC metru.

1.4.3 Teplota a vzdušná vlhkost

Teplota okolního prostředí rostliny je stěžejní pro správný průběh fotosyntézy. Příliš nízké teploty mají za následek zpomalení růstu rostliny a naopak příliš vysoké teploty se projeví na rychlém zasychání kořenového systému.

Vzdušná vlhkost je klíčovým faktorem při zavlažování rostlin. Pokud je vzdušná vlhkost vysoká, tak rostlina přijímá více vody pomocí svých listů, čímž se sníží příjem vody kořenovým systémem. V případě, že je vzdušná vlhkost nízká, je rostlina odkázána na příjem vody z kořenového systému. Vysoká úroveň vzdušné vlhkosti se ukázala jako ideální zejména při vegetativním rozmnožování (řízkování, roubování).

V hydroponických a aeroponických systémech je důležitým parametrem teplota živného roztoku, na které je závislé jeho okysličení. Na obrázku 1.15 je uvedena přibližná závislost rozpustnosti kyslíku na teplotě vody, z které lze vyčíst, že s narůstající teplotou vody klesá koncentrace kyslíku. Vysoká teplota živného roztoku také souvisí se zvýšeným rizikem výskytu a růstu plísní. Teplota roztoku by se v ideálních případech měla pohybovat v okolí 20 °C.



Obrázek 1.15: Závislost rozpustnosti kyslíku na teplotě vody [10]

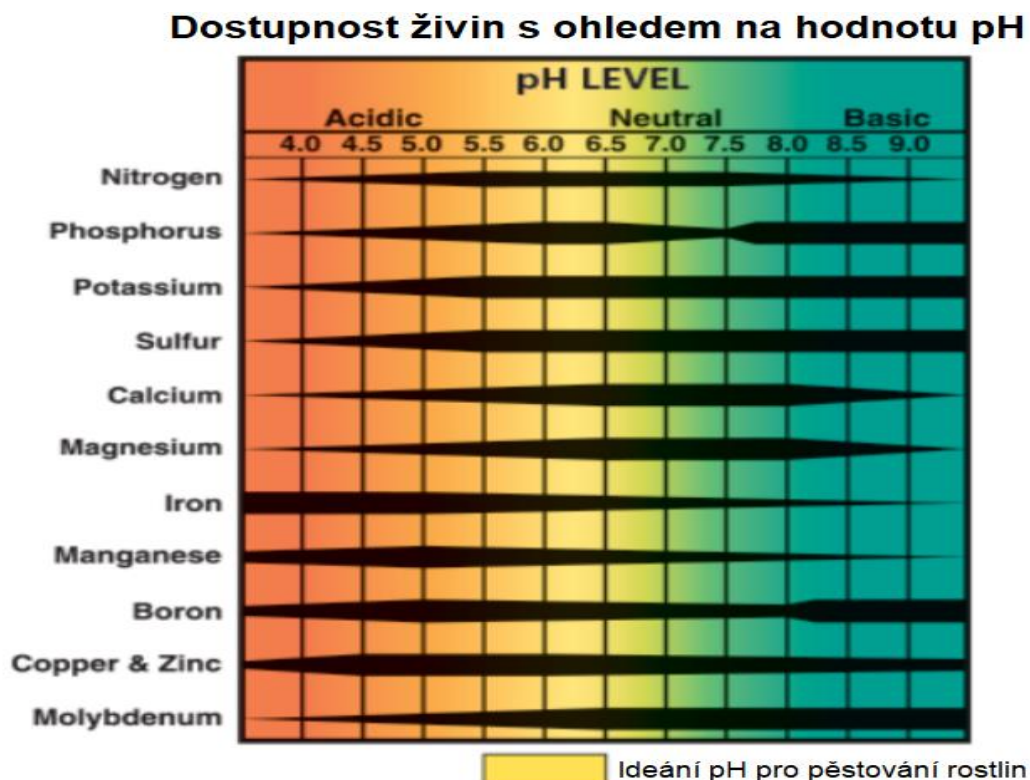
1.4.4 pH

Hodnota pH je reprezentována stupnicí s logaritmickým dělením v rozsahu 0–14, celkově tedy obsahuje 15 hodnot. Hodnota 0 je přiřazena nejkyselejším roztokům a hodnota 14 charakterizuje nejzásaditější roztoky. Označení „pH“ vyjadřuje potenciál vodíku, jelikož poměr vodíkových iontů (H^+) a hydroxidových iontů (OH^-) určuje zásaditost nebo kyselost roztoku. Neutrální pH se nachází přímo uprostřed stupnice, má tedy přiřazenou hodnotu 7.

Hodnota pH živného roztoku u hydroponického a aeroponického pěstování úzce souvisí s dostupností jednotlivých živin tak, jak je uvedeno na obrázku 1.16. Z toho obrázku lze tedy vyčíst, že optimální dostupnost potřebných živin pro pěstování, je právě v rozsahu hodnot pH 5,5 až 6,5, což odpovídá mírně kyselému prostředí.

Při vytváření živného roztoku je obvykle používána pitná voda, která má ve většině případů mírně zásaditý charakter. Hodnotu pH této vody je tedy potřeba snížit, k čemuž se využívají roztoky nebo tablety s označením „pH-“.

Pokud během pěstebního cyklu doplňujeme hladinu živného roztoku pitnou vodou, je potřeba pH živného roztoku pouze snižovat. Výjimkou je napadení kořenového systému bakteriemi nebo plísněmi, jež výrazně sníží pH živného roztoku pod požadované hodnoty.

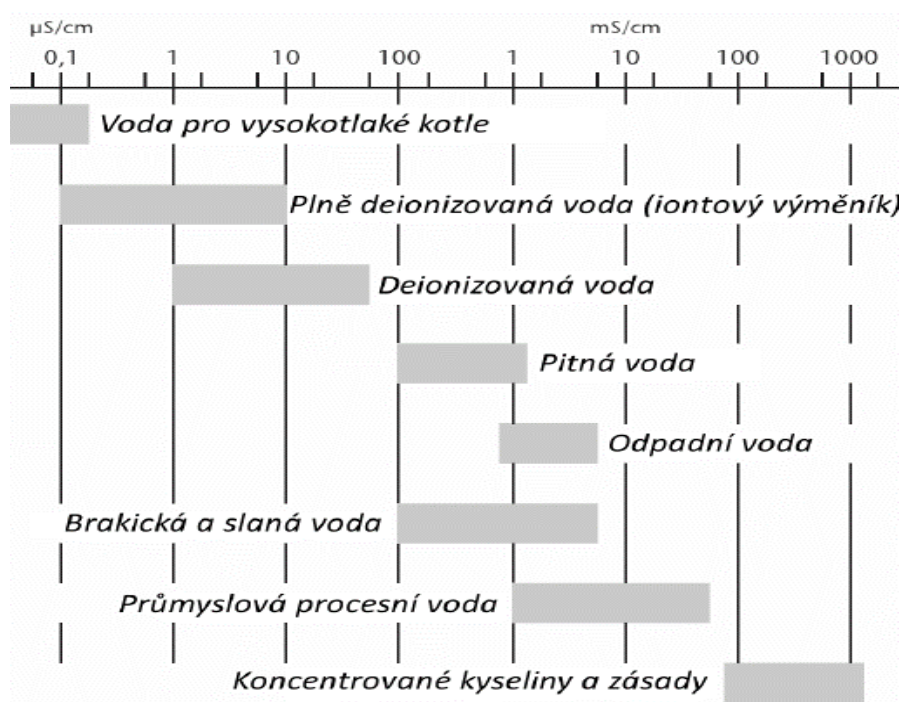


Obrázek 1.16: Dostupnost živin vzhledem k hodnotě pH [11]

1.4.5 EC (Konduktivita roztoku)

Konduktivita neboli měrná vodivost elektrolytu je veličina, která označuje celkové množství rozpuštěných minerálů v daném roztoku. Základní jednotkou konduktivity je S/m, ale v technické praxi se častěji setkáme s jednotkou mS/cm nebo $\mu\text{S/cm}$. Její průběh je silně závislý na teplotě a to tak, že se zvyšující se teplotou roztoku roste i jeho konduktivita.

V hydroponii a aeroponii nám hodnota konduktivity určuje míru rozpuštěných solí v živném roztoku. Tato míra ovšem neobsahuje žádné informace o tom, jaká je úroveň potřebných živin pro pěstování v živném roztoku. Proto se často setkáváme s pojmem „background EC“ (neboli „konduktivita na pozadí“), který udává hodnotu konduktivity vody použité pro vytvoření živného roztoku. Pokud tedy použijeme pitnou vodu, která má konduktivitu například 0,3 mS/cm a poté pomocí minerálních hnojiv zvýšíme konduktivitu této vody například na 1,5 mS/cm, tak 20 % (0,3/1,5) z celkově rozpuštěných solí v tomto roztoku je potencionálně pro rostlinu nevyužitelných. Z toho důvodu by bylo ideální k vytváření živného roztoku používat plně deionizovanou vodu, která má nízkou hodnotu konduktivity. Tento přístup by byl ale zbytečně nákladný a složitý, proto se ke snížení vodivosti vody většinou používá různých filtračních technologií, zejména reverzní osmózy. Hodnota konduktivity živného roztoku se většinou udává ve tvaru např. 1,6 EC, což představuje konduktivitu 1,6 mS/cm. Konduktivita živného roztoku se měří pomocí EC metru.



Obrázek 1.17: Vodivosti roztoků [12]

1.4.6 Ostatní

Dalším faktorem ovlivňující průběh fotosyntézy je hladina oxidu uhličitého (CO_2) v okolním prostředí rostliny. Dostatečný přísun CO_2 se projeví zejména na vitalitě rostliny a její zvýšené obranyschopnosti vůči různým chorobám a škůdcům. Koncentraci CO_2 v pěstebním prostoru lze zvýšit pomocí dávkovačů napojených na plynové bomby obsahující oxid uhličitý nebo přírodním způsobem pomocí vaků naplněných organickým substrátem a podhoubím (mycelium).

Příznivý vliv na obranyschopnost a funkci kořenového systému mají i různé houby a bakterie. Některé prospěšné houby se mohou vyskytovat i přímo v pěstebním médiu, například houba trichoderma se přirozeně vyskytuje v kokosovém vláknu.

V uzavřených pěstebních prostorech je důležitá také cirkulace vzduchu. Pro efektivní výměnu vzduchu se v takovýchto uzavřených prostorech využívá nejméně dvou ventilátorů, přičemž jeden slouží jako přítahový (vhání vzduch do uzavřeného prostoru) a druhý má funkci odtahu (odsává vzduch z uzavřené místnosti ven). Správné nastavení cirkulace vzduchu a volba ventilátorů podléhá složitým výpočtům, ve kterých hraje hlavní roli objem uzavřeného prostoru a jeho ohřev vlivem slunečního záření nebo umělého osvětlení.

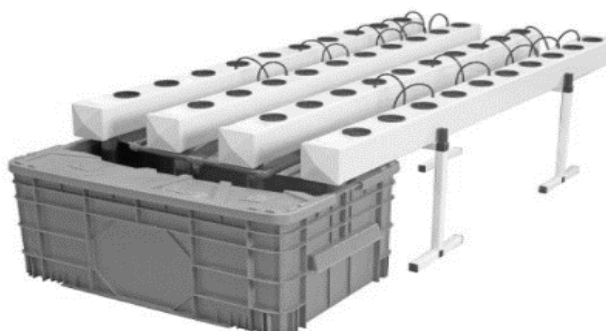
Stres vyvinutý na pěstovanou rostlinu může mít příznivé důsledky na její celkový vývoj. Rostlina se přirozeně snaží posílit své nedostatky, aby vyvolanému stresu odolala. Například při extrémních povětrnostních podmínkách se rostlina snaží odolávat tak, že zvýší objem a pevnost svého stonku. Tato metoda je ale velmi nepředvídatelná, jelikož není předem známo, jak přesně bude rostlina na daný typ stresu reagovat, může se tedy stát, že vlivem toho stresu je rostlina nenávratně poškozena.

1.5 Dostupné systémy a periferie

Systémy určené k aeroponickému a hydroponickému pěstování jsou na českém trhu běžně k dispozici. Jejich cena je ale vzhledem k jejich rozměrům příliš vysoká, a proto se většina pěstitelů stále uchyluje k běžným pěstitelským metodám. Ve vývoji těchto systémů a minerálních hnojiv převládá zejména firma General Hydroponics.

1.5.1 General Hydroponics – AeroFlo

Aeroponický systém typu LPA, jenž je vyráběn v rozměrech jak pro malé, tak i pro rozsáhlé aplikace. Výhodou těchto systému je, že jsou modulární, a tudíž je lze dle potřeby rozšířit. Tyto systémy se vyrábí s kapacitou od 10 až do 120 rostlin, přičemž cena nejmenšího systému se pohybuje okolo 8 tisíc Kč a cena největšího systému je zhruba 50 tisíc Kč.



Obrázek 1.18: AeroFlo 40 [13]

1.5.2 General Hydroponics – AeroFarm

Jedná se o nízkotlaký aeroponický systém, který je svým rozměrem určený především pro malé aplikace. Jeho hlavní předností je poměrně nízká cena a snadná kontrola úrovně hladiny živného roztoku pomocí průhledné trubice. Rostliny jsou v tomto systému zakotveny pomocí pěstební média v hydroponickém košíčku.



Obrázek 1.19: AeroFarm 2" [14]

1.5.3 Atami – Wilma

Hydroponický oběhový drip systém, který je svou náročností a rozměrem vhodný zejména pro začátečníky v oboru hydroponického pěstování. Tento systém se vyrábí ve variantách s kapacitou 4 až 20 květináčů, přičemž pro každou tuto variantu je možné zvolit rozměr těchto květináčů, s čímž souvisí také objem rezervoáru živného roztoku. Nespornou výhodou je snadná montáž toho systému a jeho celková mobilita. Cena se dle rozměru systému pohybuje od 3 až do 8 tisíc Kč.



Obrázek 1.20: Wilma S 4 - 6L [15]

1.5.4 NFT- Multi Duct

Hydroponický NFT systém určený zejména pro profesionální použití. Varianty toho systému se liší zejména plochou, která se pohybuje od 2 do 5m². Na nakloněné pěstební plošiny se umísťují zakořeněné rostliny v rockwoolových kostkách. Výhodou těchto systémů je drážkování v pěstebních plošinách, jež zlepšuje okysličení protékajícího živného roztoku. Cena těchto systémů se dle jejich rozměru pohybuje od 8 až do 22 tisíc Kč.



Obrázek 1.21: Multi Duct MD804 [16]

1.5.5 BlueLab – pH Controller

Jedná se o zařízení určené k regulaci pH živného roztoku. Dávkování kapaliny ovlivňující pH je realizováno pomocí peristaltického čerpadla. Jelikož zařízení obsahuje toto čerpadlo pouze jedenkrát, je možné v nastavení zvolit, zda je potřeba pH snižovat (dávkování kapaliny pH-), anebo zvyšovat (dávkování kapaliny pH+). Na terminálu zařízení je možné provádět různá nastavení (žádané pH, intervaly dávkování aj.) a lze zde také vyčíst okamžitou hodnotu pH a teploty roztoku.



Obrázek 1.22: BlueLab pH Controller [17]

1.5.6 Cloudponics – GroControl

Jedná se o zařízení určené k automatizaci aeroponického nebo hydroponického pěstování. Umožňuje měřit pH, EC a teplotu živného roztoku a dále relativní vlhkost, teplotu a míru osvětlení v pěstební části systému. Regulace pH je zajištěna pomocí dvojice peristaltických čerpadel (jedno pro pH+ a druhé pro pH-). Zařízení umožňuje dávkovat až 3 různé druhy tekutých hnojiv. Výstupy toho zařízení umožňují ovládat až dvě čerpadla, topení, zvlhčovač a ventilátor. Nastavení a ovládání toho zařízení je zprostředkováno pomocí mobilní aplikace. Cena toho systému se pohybuje okolo 35 tisíc Kč.

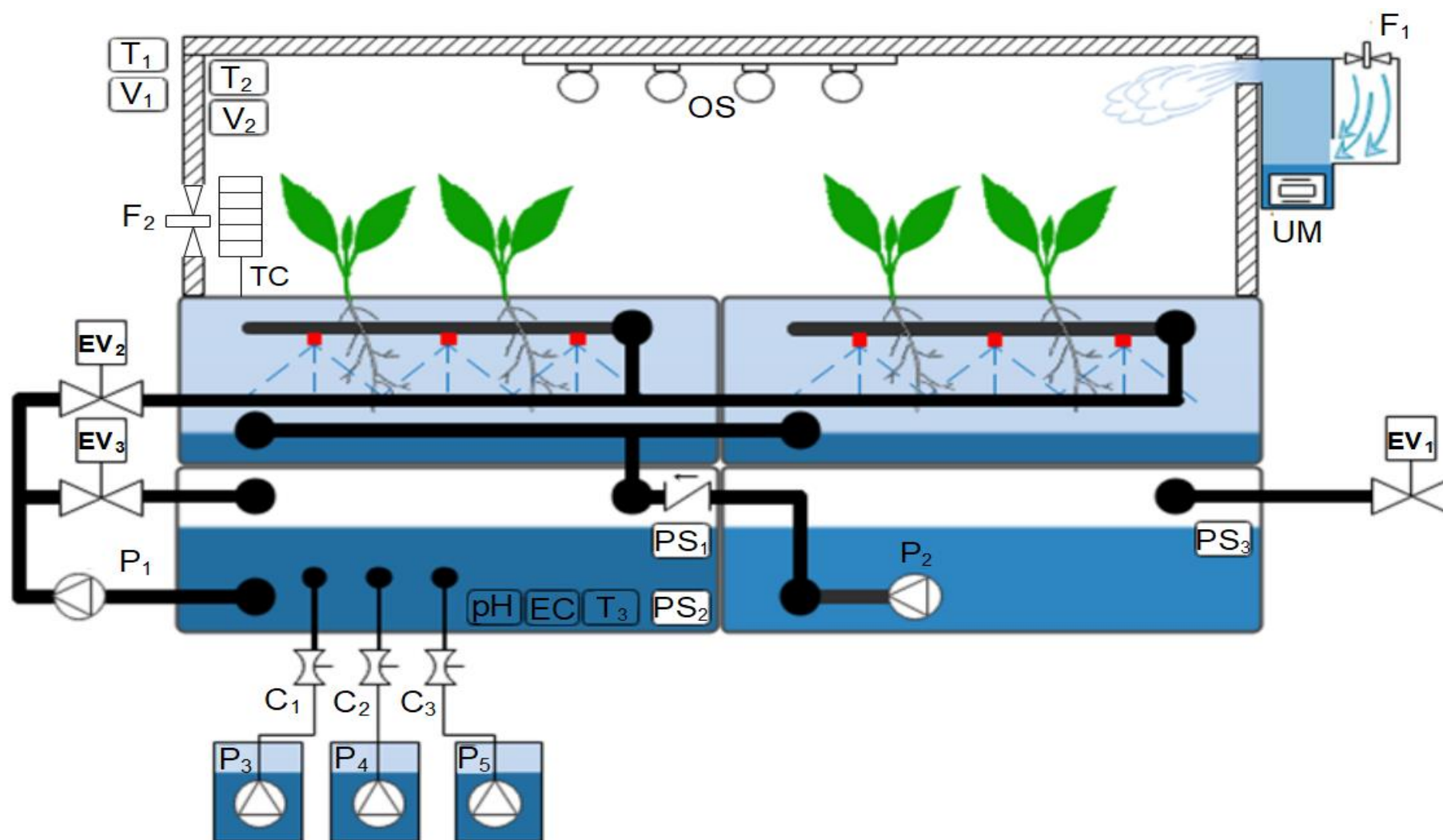


Obrázek 1.23: GroControl [18]

2 NÁVRH A REALIZACE AEROPONICKÉHO SYSTÉMU

Automatizovaný aeroponický systém má primárně sloužit k vegetativnímu rozmnožování rostlin, zejména pro roubovance odrůd melounů. Z tohoto hlediska byly stanoveny požadavky pro udržení ideálních podmínek roubovance, mezi které se řadí 100% vzdušná vlhkost a konstantní teplota. Během vegetativního rozmnožování je vhodné udržovat pH živného roztoku v blízkém okolí hodnoty 6 a EC živného roztoku v rozsahu vodivosti 0,4 až 1,2 mS/cm.

Dle těchto základních požadavků na aeroponický systém byl sestaven návrh systému, který je znázorněný na obrázku 2.1. Hlavní rozvod živin je tvořen pomocí větve obsahující membránové čerpadlo (P₁) a elektromagnetické ventily EV₂ a EV₃. Ventil EV₂ slouží pro přívod pěstební roztoku k rozprašovacím tryskám a ventil EV₃ je určen pro promíchání roztoku po přidání hnojiv nebo kyseliny/zásady v rámci regulace EC a pH. V nádobě s pěstebním roztokem je umístěn senzor hodnot pH, snímač elektrické konduktivity (EC) a senzor teploty T₃. Na základě údajů z těchto senzorů probíhá ovládání peristaltických čerpadel (P₃, P₄, P₅), které dávkuje hnojiva nebo kyselinu/zásadu. Množství dávkovaných kapalin je snímáno průtokovými čidly (C₁, C₂, C₃). Na základě údajů z plovákových spínačů (PS₁, PS₂) bude spouštěno čerpadlo P₂, které do pěstební roztoku dopouští čistou vodu. Za pomoci logického stavu plovákového spínače PS₃ bude ovládán ventil EV₁, jenž dorovná úroveň hladiny vody. Vytápění pěstební části systému bude zprostředkováno pomocí topného členu (TC) a ventilátoru (F₂). O zvýšení vzdušné vlhkosti se bude starat ultrazvukový mlhovač (UM) v kombinaci s ventilátorem F₁. Uvnitř i vně pěstebního prostoru bude snímána teplota (čidla T₁, T₂) a relativní vzdušná vlhkost (čidla V₁, V₂). V případě, že by byla pěstební část systému zkonstruována z neprůsvitného materiálu, bude přidáno i osvětlení (OS).



Obrázek 2.1: Technologické schéma aeroponického systému

2.1 Konstrukční část

Konstrukce výsledného systému je složená z rezervoáru na živný roztok, rezervoáru na pitnou vodu, dvou pěstebních nádob a průsvitného poklopu, který představuje uzavřený pěstební prostor. Jednotlivé komponenty a materiály pro výrobu systému byly voleny tak, aby byla výsledná manipulace s tímto systémem co nejjednodušší.

Pro výrobu rezervoárů a pěstebních nádob byly použity neprůsvitné euro přepravy s plným úchytem. Tyto přepravy jsou odolné vůči trvalému působení kyselých i zásaditých roztoků, díky jejich jednoduchému tvaru je lze snadno čistit a další výhodou je, že jsou lehce stohovatelné. Připojení jednotlivých hadic určených k distribuci živného roztoku a vody bylo realizováno pomocí rychlospojek, které jsou přes stěnu přepravy uchyceny pomocí závitů zatěsněného teflonovou páskou. Díky snadné manipulaci s rychlospojkami lze celý systém rychle rozložit, s čímž se pojí jeho snadná údržba. Propojení jednotlivých přeprav bylo koncipováno tak, aby bylo možné celý systém jednoduše rozšířit. Pokud tedy bude potřeba navýšit kapacitu systému, je možné použít další pěstební nádobu, která se pomocí jedné rychlospojky připojí k okruhu s membránovým čerpadlem, a pomocí připojení druhé rychlospojky je zajištěn odvod nahromaděného živného roztoku (viz spojení pěstebních nádob umístěných vedle sebe na obrázku 2.1).

K zakotvení rostlin v systému slouží hydroponické košíčky, do kterých budou osazeny rockwoolové kostky. Tyto košíčky jsou umístěny v předem navrtaných dírách ve víku přepravy. Systém je určený pro kapacitu 154 rostlin. Tuto kapacitu lze dle potřeby snadno změnit a to tak, že použijeme nové víko k přepravce, které bude mít předvrtaný požadovaný počet děr o daném průměru. Systém lze tedy použít jak pro pěstování malých (řízky, roubovance), tak i velkých (rajčata, okurky) rostlin a to pouze jednoduchou výměnou upraveného víka pěstební nádoby.

Jelikož bude navrhovaný systém umístěný na dobře osvětleném místě, tak byl poklop systému vytvořen z čirého jednokomorového lexanu. Tento materiál se vyznačuje zejména svou odolností a výbornými tepelně izolačními vlastnostmi. Výsledný rozměr systému i s poklopem činí 60x80x70 cm (DxŠxV).

2.2 Řídicí jednotka systému

Volba řídicí jednotky byla podmíněna zejména požadavkem na výsledné ovládání celého systému pomocí uživatelského rozhraní na dotykové obrazovce. K tomuto účelu se jako ideální jeví buď mikrokontrolér Arduino nebo mikropočítač Raspberry pi. Z důvodu snazší implementace možných budoucích rozšíření systému v podobě webového rozhraní nebo monitorování pěstebního prostoru pomocí kamery byl k řízení aeroponického systému vybrán mikropočítač Raspberry Pi 3 model B.

Raspberry Pi je jednodeskový počítač jehož jednotlivé části jsou implementovány na desce plošného spoje která má zhruba velikost běžné platební karty. Tento mikropočítač umožňuje připojení a používání běžných periférií mezi které se řadí zejména myš, klávesnice, monitor a výstupní audio zařízení. Na desce počítače se dále nachází konektor DSI určený pro připojení vlastního displeje, konektor CSI umožňující připojení kamery a GPIO konektor, který umožňuje komunikaci s příslušnými moduly a ovládání připojených výstupních zařízení. Piny GPIO konektoru využívají logickou napětovou úroveň 3,3 V. Počítač je napájen napětím 5 V, které je zajištěno pomocí microUSB kabelu.

Zvolený model Raspberry Pi 3B disponuje čtyř jádrovým 64 bitovým procesorem s taktovací frekvencí 1,2 GHz, operační pamětí 1 GB, čtyřmi USB konektory, ethernet konektorem a zabudovanou WiFi 802.11 b/g/n.

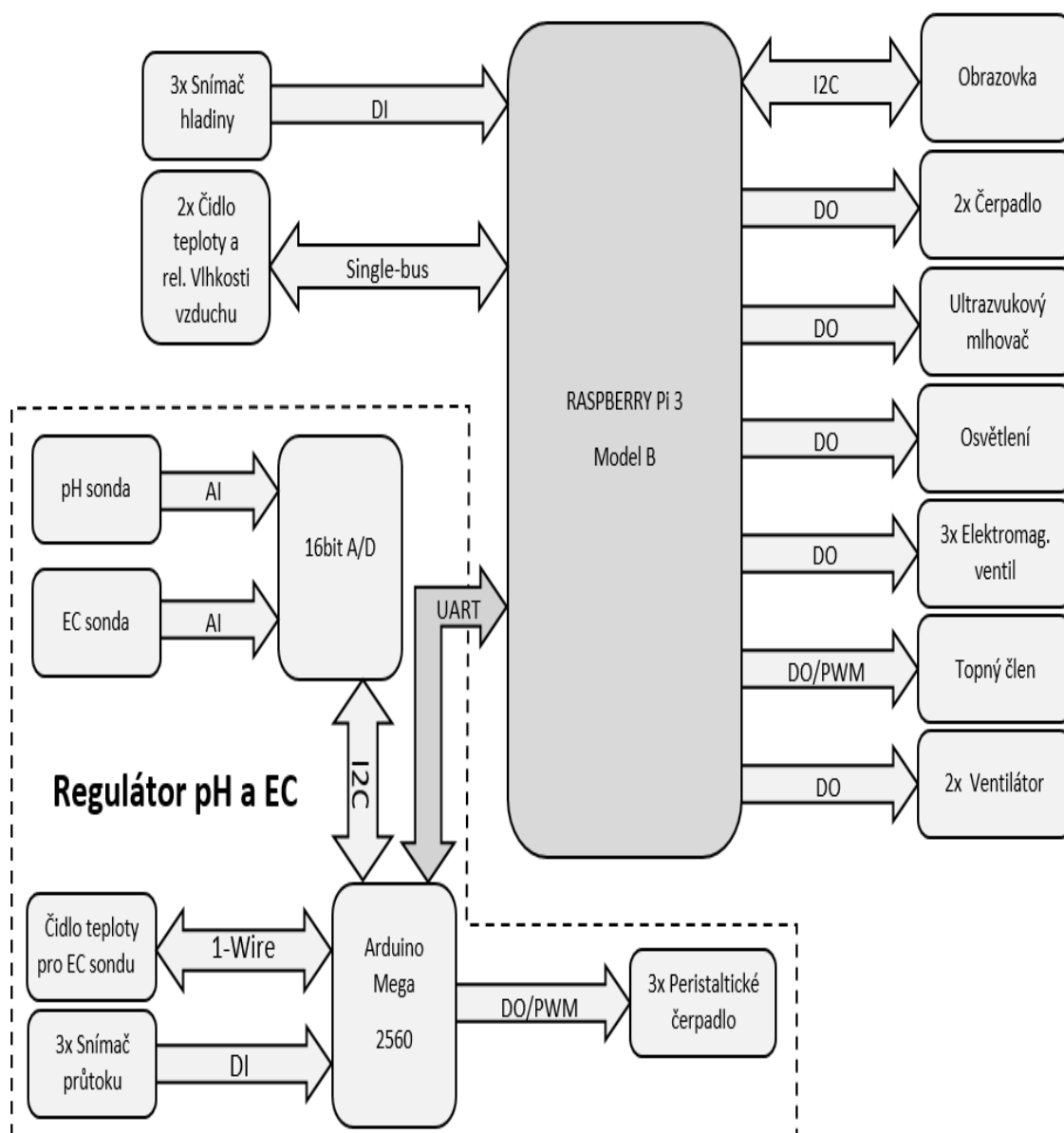
Pro řídicí jednotku byl zvolen operační systém Raspbian-stretch, jenž je oficiálně podporovaný výrobcem. Operační systém byl nainstalovaný pomocí programu NOOBS.



Obrázek 2.2: Raspberry Pi 3 Model B

2.3 Blokové schéma systému

Jako hlavní řídicí jednotka systému byl zvolen mikropočítač Raspberry Pi 3. Ovládání a nastavování systému je zprostředkováno pomocí obrazovky komunikující po protokolu I²C. Regulátor EC a pH je realizován jako samostatná jednotka, jejíž řízení probíhá pomocí Arduina Mega 2560. Regulátor si s hlavní řídicí jednotkou předává data pomocí protokolu UART. Hodnoty z analogových senzorů pH a EC jsou převáděny 16 bitovým A/D převodníkem, který komunikuje s regulátorem (Arduino Mega 2560) pomocí protokolu I²C. K měření teploty a relativní vzdušné vlhkosti jsou použity digitální čidla využívající komunikační protokol Single-bus.



Obrázek 2.3: Blokové komunikační schéma

2.4 Vstupní a výstupní periferie

Při výběru vstupních a výstupních komponent bylo dbáno na to, aby byla zachována celková modulárnost systému z důvodu snadné výměny těchto komponent při poruše.

2.4.1 Membránové čerpadlo

Tyto typy čerpadel se využívají pro vysokotlaké aplikace. V navrženém systému je toto čerpadlo použito k vytváření živného aerosolu a promíchávání živného roztoku. Při plném výkonu dosahuje tlak na výstupu čerpadla limitní hodnoty 0,48 MPa (70 psi). Čerpadlo je napájeno pomocí 12V zdroje, jenž je připojen do vestavné zásuvky umístěné na řídicím terminálu systému. Výkon čerpadla byl zvolen tak, aby byla zaručena bezproblémová funkce elektromagnetických ventilů a aby hadicové rozvody systému nebyly zbytečně tlakově přetěžované.

Tabulka 2.1: Parametry membránového čerpadla (Převzato ze štítku)

Výkon [W]	24
Napájecí napětí [V]	12 (DC)
Max. tlak [MPa]	0,48
Max. průtok [L/min]	3,5



Obrázek 2.4: Membránové čerpadlo

2.4.2 Ponorné čerpadlo

Pro přečerpávání pitné vody do rezervoáru s živným roztokem bylo použito odstředivé ponorné čerpadlo. Spínání tohoto čerpadla je závislé na hladině živného roztoku. Jakmile tedy poklesne hladina živného roztoku pod spodní úroveň indikovanou hladinovým snímačem, dochází k aktivaci tohoto čerpadla, které se vypne až při dosažení maximální hladiny živného roztoku. Čerpadlo je napájeno z vestavné zásuvky řídicího terminálu systému, která je spínaná pomocí relé.

Tabulka 2.2: Parametry ponorného čerpadla (Převzato ze štítku)

Výkon [W]	25
Napájecí napětí [V]	230 (AC)
Max. výtlač [m]	1,2
Max. průtok [L/h]	1750



Obrázek 2.5: Ponorné čerpadlo

2.4.3 Elektromagnetický ventil

Elektromagnetický ventil obsahuje solenoidovou cívku, jejíž pohyblivé jádro je spojeno s membránou zamezující průtok vody. V případě, že je na vývody cívky přivedeno napětí, se vlivem elektromagnetického pole jádro cívky posune a odblokuje membránu, přes kterou může následně kapalina protékat.

V navrženém systému jsou použity tři takovéto ventily, přičemž jeden slouží k doplňování pitné vody (EV_1), druhý k cirkulaci živného roztoku (EV_3) a poslední k aktivaci mlhovacích trysek (EV_2). Tyto ventily jsou připojeny ke svorkovnici umístěné na řídicím terminálu systému, z které jsou spínány pomocí jednotlivých relé. Sepnutí požadovaného ventilu vždy přechází sepnutí čerpadla. Pokud je tedy například aktivováno promíchávání živného roztoku, nejprve sepne ventil EV_3 , a až poté je aktivováno i čerpadlo. Při deaktivaci promíchávání je proces opačný, nejprve se vypne čerpadlo, a až poté se vypne i EV_3 . Tato funkce byla implementována zejména kvůli ochraně hadicových rozvodů před vysokým tlakem.

Tabulka 2.3: Parametry elektromagnetického ventilu (Převzato ze štítku)

Spotřeba [W]	5
Napájecí napětí [V]	12 (DC)
Pracovní tlak [MPa]	0,02–0,8
Max. průtok [L/min]	28



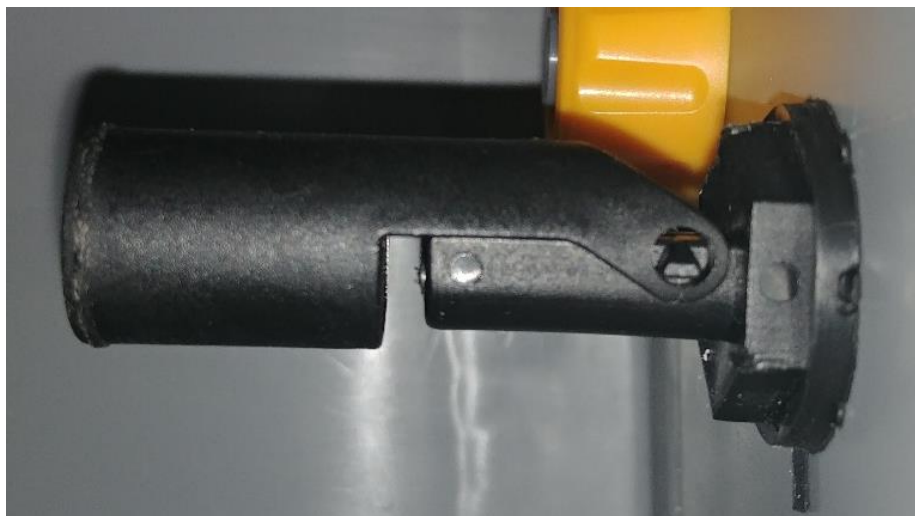
Obrázek 2.6: Elektromagnetický ventil

2.4.4 Snímač hladiny

Pro indikaci hladiny v rezervoárech s vodou a živným roztokem bylo použito spínačů pracujících na plovákovém principu. Tento snímač se skládá z pevné a pohyblivé části. Pevná část v sobě obsahuje jazýčkové relé, které je v závislosti na hladině kapaliny spínáno pomocí magnetu umístěného v pohyblivé plovoucí části. Z bezpečnostních důvodů byly snímače horní hladiny instalovány tak, aby v případě dosažení maximální úrovně kapaliny došlo k rozepnutí jazýčkového relé. Pokud by tedy došlo k přerušení vodiče vedoucího od jazýčkového relé, je znemožněna aktivace daného čerpadla a nemůže tak dojít k přetečení rezervoáru. Jednotlivé snímače hladiny jsou připojeny přes pull-down rezistory k digitálním vstupům řídicí jednotky. Umístění hladinového snímače v rezervoáru je znázorněno na obrázku 2.7.

Tabulka 2.4: Parametry snímače hladiny YD044-SZ (Převzato ze štítku)

Max. spínané napětí [V]	110 (AC)
Max. spínaný proud [A]	0,5
Odpor spínače [Ω]	100



Obrázek 2.7: Snímač hladiny YD044-SZ

2.4.5 Čidlo teploty a vzdušné vlhkosti

K měření teploty a relativní vlhkosti pěstebního prostoru a okolního prostředí bylo použito čidlo DHT21. Toto čidlo je umístěno v plastovém pouzdře, které ho chrání před mechanickým poškozením a nepříznivými vlivy. Čidlo je napájeno z řídicí jednotky systému a komunikuje s ní pomocí sériového protokolu Single-Bus. Jelikož byla pro ovládání jednotlivých rozhraní Raspberry Pi použita knihovna WiringPi napsaná v jazyce C, tak pro toto čidlo není k dispozici žádná oficiální knihovna umožňující vyčítat jeho data. Z toho důvodu byla vytvořena knihovna dht21.h, která čtení hodnot z tohoto čidla umožňuje, a to pomocí funkcí knihovny WiringPi. Hlavní nevýhodou toho čidla je poměrně dlouhá perioda čtení, která činí 2 s. Jelikož se ale v navrhovaném systému nepředpokládají rychlé změny teplot, je možné tuto skutečnost zanedbat. Čidlo je připojeno k řídicí jednotce systému pomocí tří vodičů (napájení, uzemnění a datový vodič). Pull-up rezistor datového vodiče je již obsažen v pouzdře čidla.

Tabulka 2.5: Parametry čidla DHT21 (Převzato ze štítku)

Pracovní napětí [V]	3,3–5,2
Rozsah měřené vlhkosti [% RH]	0–99,9
Rozsah měřené teploty [°C]	-40–80
Přesnost měření vlhkosti [% RH]	± 3 (při 25 °C)
Přesnost teplotního měření [°C]	± 0,5
Perioda čtení [s]	2



Obrázek 2.8: Čidlo DHT21

2.4.6 Topný člen

K navýšení teploty v pěstební části systému slouží topný člen. Ten byl zkonstruován ze dvou topných těles o celkovém výkonu 80 W. Tato tělesa jsou upevněna na hliníkovém chladiči, který zajišťuje odvod vzniklého tepla do okolního prostředí. Pro lepší odvod tepla z hliníkového chladiče byl topný člen rozšířen o axiální ventilátor. Tento ventilátor lze spínat i nezávisle na topných tělesech, tudíž jím může být zprostředkována cirkulace vzduchu v pěstební části systému. Výkon topných těles je řízený pomocí MOSFET PWM modulu. Výstup tohoto modulu je vyveden na svorkovnici umístěnou na řídicím terminálu systému.

Při plném výkonu topného tělesa lze navýšit teplotu pěstebního prostoru až o cca 10 °C v závislosti na okolních podmínkách.

Tabulka 2.6: Parametry topného členu (Převzato ze štítků)

Napájecí napětí topného tělesa [V]	12
Výkon topného tělesa [W]	80
Napájecí napětí ventilátoru [V]	12
Výkon ventilátoru [W]	0,72
Max. průtok ventilátoru [m ³ /h]	125,7



Obrázek 2.9: Topný člen

2.4.7 Zvlhčovač vzduchu

Jedním z hlavních požadavků na navrhovaný systém je regulace vlhkosti v pěstebním prostoru. Z toho důvodu byla vytvořena jednotka určená pro zvýšení úrovně vlhkosti vzduchu. Konstrukční část této jednotky je vytvořena z plastových hranatých ventilačních potrubí, které jsou vodotěsně spojeny pomocí příslušných tvarovek. Spodní část jednotky je naplněna vodou, ve které je umístěný ultrazvukový mlhovač (princip funkce viz kapitola 1.2.3 Ultrazvukový systém). V případě požadavku na zvýšení vlhkosti v pěstební části prostoru je nejdříve aktivován ultrazvukový mlhovač, jenž začne generovat vodní mlhu, a následně je spuštěn ventilátor, který se postará o to, aby se tato mlha dostala do pěstebního prostoru. Pro ideální funkci ultrazvukového mlhovače by se měla hladina vody ve spodní části jednotky pohybovat okolo 6 cm.

Navržená jednotka zvlhčovače vzduchu připojená k pěstební části systému je vyobrazena na obrázku 2.10.

Tabulka 2.7: Parametry zvlhčovače vzduchu (Převzato ze štítků)

Napájecí napětí ultrazvukového mlhovače [V]	24
Výkon ultrazvukového mlhovače [W]	19
Pracovní frekvence [kHz]	1700 ± 50
Spotřeba vody [ml/h]	350
Napájecí napětí ventilátoru [V]	12
Výkon ventilátoru [W]	3
Max. průtok ventilátoru [m ³ /h]	39,18



Obrázek 2.10: Zvlhčovač vzduchu

2.4.8 Regulátor pH a EC

Jedná se o zařízení určené k regulaci pH a EC živného roztoku. Jednotlivé požadavky na toto zařízení a jeho funkčnost jsou shrnuty v kapitole 2.5 (Návrh regulátoru pH a EC).

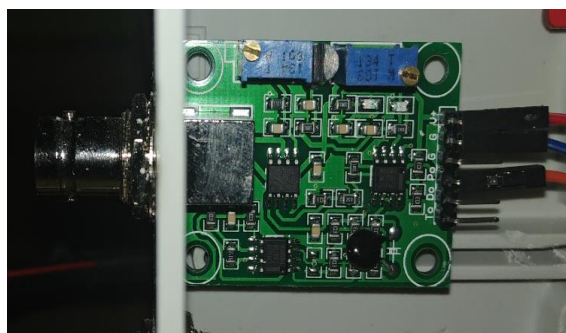
K měření hodnot pH byla použita sonda obsahující referenční a měřicí elektrodu. Jedná se tedy o potenciometrické měření pH. Tato sonda se připojuje pomocí BNC konektoru k převodníku, který je umístěn uvnitř regulátoru.

Tabulka 2.8: Parametry pH sondy (Převzato ze štítku)

Pracovní napětí [V]	$5 \pm 0,2$
Spotřeba převodníku [W]	$<0,5$
Rozsah měřeného pH	0–14
Přesnost měření pH	$\pm 0,2$
Perioda měření [s]	5



Obrázek 2.11: pH sonda



Obrázek 2.12: Převodník pH sondy

Pro teplotní kompenzaci při kalibraci EC sondy slouží čidlo DS18B20. To je umístěno přímo v těle EC sondy a lze z něj tedy vyčítat aktuální hodnotu teploty živného roztoku. Toto čidlo komunikuje s řídicí jednotkou regulátoru pomocí sériového protokolu 1-WIRE. Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 2.9.

Tabulka 2.9: Parametry teplotního čidla DS18B20

Pracovní napětí [V]	3,3–5,2
Rozsah měřené teploty [°C]	-55–125
Přesnost teplotního měření [°C]	$\pm 0,5$
Perioda měření [ms]	2

K převádění hodnoty napětového úbytku předřadného odporu EC sondy do digitální formy je použito A/D převodníku MCP3424. Tento převodník umožňuje diferenciální měření napětí. Lze jím tedy realizovat měření konduktivity střídavým napětím. Pomocí řídicí jednotky regulátoru je rozlišení převodníku nastaveno na 16 bitů.

Tabulka 2.10: Parametry A/D převodníku MCP3424 (Převzato ze štítku)

Pracovní napětí [V]	2,7–5,5
Rozlišení [bit]	12, 14, 16, 18
Zesilovač zisku (PGA)	x1, x2, x4, x8
Rozsah snímaného napětí [V]	4,096/PGA

Pro dávkování jednotlivých kapalin ovlivňujících pH a EC živného roztoku byla použity tři peristaltické čerpadla. Tento typ čerpadla je složený s DC motoru, jehož hřídel pohání rotační část s válečky, které deformují elastickou hadici. Tato deformace se vlivem rotačního pohybu posunuje a na jedné straně hadičky tak vzniká podtlak, který umožňuje čerpat danou kapalinu. Nevýhodou těchto čerpadel je poměrně rychlá degradace elastické hadičky vlivem tření. Cena těchto hadiček je ale nízká a jejich výměna jednoduchá.

Peristaltické čerpadla jsou řízena nezávisle pomocí MOSFET PWM modulů připojených k řídicí jednotce regulátoru. Pomocí PWM výstupu řídicí jednotky lze tedy měnit napájecí napětí těchto čerpadel a tím i jejich průtok. Čerpadla osazená na regulátoru pH a EC jsou znázorněna na obrázku 2.13.

Tabulka 2.11: Parametry peristaltického čerpadla (Převzato ze štítku)

Napájecí napětí [V]	12
Spotřeba [mA]	300
Rozsah průtoku [ml/m]	5–40



Obrázek 2.13: Peristaltické čerpadla

Ovládání jednotlivých peristaltických čerpadel je zajištěno pomocí modulu obsahujícího unipolární tranzistor typu MOSFET. Tento modul je ovládaný PWM výstupem řídicí jednotky regulátoru.

Tabulka 2.12: Parametry MOSFET PWM modulu IRF520 (Převzato ze štítku)

Řídicí napětí [V]	3,3 – 5
Spínané napětí [V]	0 až 24
Spínaný proud [A]	5 (chladič od 1 A)



Obrázek 2.14: MOSFET PWM modul IRF520

K měření celkové spotřeby dávkovaných kapalin slouží lopatkové snímače průtoku YF-S401. Výstup těchto průtokoměrů tvoří obdélníkový signál se střídou 50 %. Nástupná hrana výstupního signálu představuje přibližně 0,17 ml protečené kapaliny. Nástupné hrany tohoto signálu jsou snímány pomocí externího přerušení řídicí jednotky regulátoru.

Tabulka 2.13: Parametry průtokoměru YF-S401 (Převzato ze štítku)

Pracovní napětí [V]	5–12
Spotřeba [mA]	15
Rozsah měřeného průtoku [L/m]	0,3–6
Počet impulsů na 1 L kapaliny	5880



Obrázek 2.15: Průtokoměry YF-S401

2.4.9 Relé modul

Ovládání akčních členů systému je zprostředkováno pomocí modulu obsahujícího 8 relé. Jednotlivá relé jsou ovládána pomocí bipolárního tranzistoru, jehož báze je řízena výstupem optočlenu. Zapojení těchto relé obsahuje i tzv. „flyback diodu“ která eliminuje napěťové špičky při rozpínání indukční zátěže. Modul je určený především pro 5V logiku. Jelikož jsou jednotlivá relé ovládána pomocí Raspberry Pi využívajícího 3.3V logiku, tak musely být pro správnou funkčnost propojeny piny JD-VCC a VCC umístěné na relé modulu. Tím bylo zajištěno, že budou cívky jednotlivých relé buzeny pomocí napětí o úrovni 5 V. Nevýhodou toho modulu je ovládání jednotlivých relé v inverzním režimu. Pokud tedy na daný vstup relé přivedeme logickou úroveň „HIGH“, tak se výstup relé rozepne. Tento problém lze však snadno eliminovat použitím logického invertoru.

Pomocí toho relé modulu jsou ovládány dvě vestavné zásuvky (určené pro membránové čerpadlo a odstředivé čerpadlo) se střídavým napětím 230 V, tři elektromagnetické ventily, dva ventilátory a ultrazvukový mlhovač.

Tabulka 2.14: Parametry modulu s relé (Převzato ze štítku)

Pracovní napětí [V]	5
Max. spínané napětí [V]	250 (AC), 30 (DC)
Max. spínaný proud [A]	10
Výkon jedné cívky [W]	0,36



Obrázek 2.16: Relé modul

2.4.10 MOSFET PWM modul

Jelikož bude regulace teploty pěstebního prostoru probíhat spojitě, bylo nutné zajistit ovládání výkonu topného členu. K tomuto ovládání byl zvolen modul osazený dvěma paralelně zapojenými MOSFET tranzistory. Toto zapojení se vyznačuje zejména tím, že umožňuje spínat velké proudy bez nutnosti použití externího chladiče. Modul je možno řídit pomocí PWM signálu o napěťové úrovni 3,3 až 20 V. V navrhovaném systému je modul připojený k řídicímu počítači Raspberry Pi, který umožňuje generování hardwarového PWM signálu na pinech GPIO18 a GPIO19.

Tabulka 2.15: Parametry MOSFET PWM modulu (Převzato ze štítku)

Řídicí napětí [V]	3,3–20
Spínané napětí [V]	5–36
Spínaný proud [A]	30 (chladič od 15 A)



Obrázek 2.17: MOSFET PWM modul

2.4.11 Obrazovka

Výsledné rozhraní systému je možné ovládat pomocí 7“ dotykové obrazovky. Tato obrazovka je oficiálním příslušenstvím pro Raspberry Pi. K mikropočítači se připojuje pomocí GPIO pinů (I²C) a DSI portu.

Tabulka 2.16: Parametry dotykové obrazovky (Převzato ze štítku)

Napájecí napětí [V]	5
Napájecí proud [A]	0,5
Rozlišení [pix]	1024x600



Obrázek 2.18: Dotyková obrazovka

2.5 Návrh regulátoru pH a EC

Jedním z hlavních nároků kladených na výsledný aeroponický systém je regulace pH a EC živného roztoku. Úpravu těchto parametrů bude zajišťovat regulátor, jehož hlavní částí jsou komponenty uvedené v podkapitole 2.4.3 (Regulátor pH a EC).

Tento regulátor byl koncipován tak, aby ho bylo možné použít nezávisle na navrhovaném systému. Z toho důvodu bylo nutné zvolit vhodnou řídicí jednotku, která by umožnila realizovat jednotlivé procesy měření a regulace.

Na výsledný regulátor byly kladeny následující požadavky:

- Měření pH a EC s dostatečným rozlišením (minimálně 0,1 pH a 0,1 mS/cm)
- Regulace těchto měřených parametrů pomocí kapalin dávkovaných peristaltickými čerpadly
- Návrh a realizace EC sondy
- Ovládání výkonu peristaltických čerpadel pomocí PWM signálu
- Kalibrace jednotlivých sond
- Měření celkového objemu dávkovaných kapalin
- Nastavení dílčích parametrů regulátoru pomocí externí komunikace

2.5.1 Řídicí jednotka

Při výběru řídicí jednotky bylo dbáno zejména na to, aby byla výsledná implementace použitých modulů co nejsnazší. K tomuto účelu byla tedy zvolena open-source elektronická platforma Arduino, která má rozsáhlou podporu knihoven zvolených modulů. Pro řízení bylo použito Arduino MEGA 2560.

Tento model je osazený mikrokontrolérem ATmega2560, který poskytuje až 16 analogových vstupů a 54 digitálních vstupů a výstupů. Tyto piny jsou založeny na 5V logice. Dále tento model obsahuje piny SDA a SCL určené pro sériovou sběrnici I²C a čtveřici pinů RX/TX určených pro UART komunikaci.

2.5.2 Měření pH

Jedním z velmi důležitých parametrů vodných roztoků je jeho pH. Podle přesnosti s jakou je potřeba tuto hodnotu znát, se volí způsob jejího měření. Při orientačním stanovení pH se využívá acidobazických indikátorů nebo indikátorových papírků. Pro měření pH s větší přesností se používají přístroje zvané pH metry.

Hodnotu pH lze definovat jako záporně vzatý dekadický logaritmus aktivity oxoniových kationtů. Ve zředěném vodném roztoku lze tuto hodnotu aktivity aproximovat hodnotou koncentrace, přičemž platí vztah [19]:

$$pH = -\log(c(H_3O^+)) \quad (2.1)$$

Metoda potenciometrického měření pH je založena na měření rovnovážného stavu elektromotorického napětí galvanického článku, jenž je tvořený dvěma elektrodami ponořenými do měřeného roztoku. Jedna elektroda slouží jako srovnávací (referenční), jelikož je u ní známí konstantní elektrodový potenciál. Nejčastěji se jedná o kalomelovou nebo argentchloridovou elektrodu. Další elektroda je měřicí (indikační) a její potenciál je funkcí aktivity vodíkových iontů (H^+). Potenciál měřicí elektrody je dán Nernstovou rovnicí [19]:

$$\varphi = \varphi_0 \pm \frac{RT}{nF} \ln(\alpha_i) = \varphi_0 \pm \frac{2,303RT}{nF} \log(\alpha_i) \quad (2.2)$$

kde je:	φ	Potenciál měřicí elektrody [V]
	φ_0	Standartní potenciál [V]
	n	Mocenství iontů [-]
	F	Faradayova konstanta [C/mol]
	R	Univerzální plynová konstanta [J/(mol·K)]
	α_i	Aktivita iontů > 0 [-]

Pro měření hodnoty pH živného roztoku byla použita sonda založená na potenciometrické metodě měření. Sonda složená z dvou elektrod je pomocí BNC konektoru spojena s převodníkem, jehož analogový výstup představující naměřenou hodnotu pH, nabývá hodnot od 0 do 5 V. Toto napětí je snímáno pomocí analogového vstupu Arduina. Pro stanovení výsledné hodnoty pH je nejprve získáno 5 hodnot napětí, z analogového výstupu převodníku pH, které jsou dále seřazeny dle velikosti, přičemž největší a nejmenší hodnota je odstraněna z důvodu potlačení chyby měření. Z těchto tří hodnot napětí je následně vytvořen aritmetický průměr, který se nejprve vynásobí koeficientem -5,7 a poté sečte s kalibrační konstantou, čímž získáme měřenou hodnotu pH.

2.5.3 Měření EC

Obor zabývající se problematikou měření konduktivity elektrolytů se nazývá konduktometrie. Konduktivita se řadí mezi jednu ze základních aditivních vlastností kapalných roztoků, ve kterých vlivem disociace vznikají elektricky nabitě částice umožňující průchod elektrického proudu. Hodnota konduktivity elektrolytu je závislá především na celkové koncentraci iontů v roztoku a jejich pohyblivosti dle rovnice [12]:

$$\kappa = \Lambda_T \cdot c \quad (2.3)$$

kde je:

κ	Konduktivita elektrolytu [S/cm]
Λ_T	Molární konduktivita [$\text{S}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mol}^{-1}$]
c	Molární koncentrace [mol/l]

Při měření konduktivity kontaktní metodou se využívají elektrody ponořené do elektrolytu, přičemž je na ně následně přivedeno elektrické napětí. Vlivem tohoto napětí se ve vzniklém elektrickém poli začnou pohybovat elektricky nabitě částice k opačně nabitým elektrodám, čímž začne obvodem protékat proud. Tento proud je přímo úměrný počtu nabitých částic, jejich pohyblivosti a elektrickému napětí. Výsledný podíl proudu tekoucího obvodem a napětí na elektrodách je roven elektrické vodivosti G . Pro určení vztahu mezi konduktivitou a vodivostí je nutné brát v potaz geometrické vlastnosti vodivostní sondy, což lze vyjádřit jako [12]:

$$\kappa = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{A} = G \cdot k \quad (2.4)$$

kde je:

I	Proud [A]
U	Napětí na elektrodách [V]
l	Vzdálenost elektrod [cm]
A	Plocha elektrod [cm^2]
k	Geometrické rozměry snímače [cm^{-1}]

Tento vztah je však možné uplatnit pouze za předpokladu homogenního proudového pole mezi elektrodami. Tuto podmínku však téměř nikdy nelze splnit a z toho důvodu se konstanta sondy obvykle určuje experimentálně jako podíl známé konduktivity a změřené vodivosti [12]:

$$k = \frac{\kappa}{G} \quad (2.5)$$

Se zvýšením teploty roztoku dochází ke zvýšení četnosti molekul disociovaných na kationty a anionty při konstantním napájecím napětí. Důsledkem toho se zvýší proud procházející elektrolytem. Konduktivita roztoků tedy s teplotou roste. U malých koncentrací do 0,05 mol a malých rozsahů teplot lze tuto teplotní závislost aproximovat vztahem [12]:

$$\kappa_T = \kappa_0[1 + \beta \cdot (T - T_0)] \quad [S/cm] \quad (2.6)$$

kde je:	κ_T	Konduktivita při teplotě T [S/cm]
	κ_0	Konduktivita při referenční teplotě T_0 (obvykle 25 °C)
	β	Teplotní činitel měrné vodivosti [K ⁻¹]

Pro směsi hnojiv užívané v hydroponických a aeroponických zařízeních se teplotní činitel β volí jako 0.019 K⁻¹.

Měření konduktivity je zatíženo zejména polarizačním efektem a elektrolýzou. Tyto jevy vznikají působením stejnosměrného proudu, kdy v roztoku dochází k pohybu volných iontů směrem k elektrodám, na kterých tyto ionty reagují s jejich povrchem (polarizace), ale i k rozkladu molekul roztoku na ionty (elektrolýza). Ionty tak reagují s materiálem elektrod i samotným roztokem. Tímto způsobem se můžou v roztoku uvolňovat prvky a vytvářet nové sloučeniny, což podstatně ovlivňuje elektrickou vodivost roztoku. Tento efekt se výrazně projevuje na nízkých kmitočtech. Proto je vhodné pro měření vodivosti kapalin použít vyšších kmitočtů a vhodných materiálů na výrobu elektrod[12].

Pro měření vodivosti kapalin se využívá dvouelektrodových nebo čtyřelektrodových kontaktních snímačů vodivosti. Dvouelektrodové snímače jsou konstrukčně jednodušší ale, zato se u nich ve velké míře projevuje efekt polarizace elektrod. Proto nejsou vhodné pro roztoky o vysoké vodivosti. Čtyřelektrodové snímače jsou konstrukčně složitější, avšak díky odděleným proudovým a napěťovým elektrodám je dosaženo výrazného potlačení polarizačního efektu. Tím je možné tyto snímače použít pro měření ve velkém rozsahu vodivostí.

Výsledné měření vodivosti živného roztoku je realizováno pomocí navrženého dvouelektrodového snímače vodivosti, jenž je zapojený do odporového děliče. Hodnota napětí na předřadném odporu tohoto děliče je snímána pomocí 16bitového A/D převodníku. Pokud je přivedený požadavek na měření EC, je nejprve provedeno pulsní buzení zmíněného děliče, při kterém se stanoví úbytek napětí na předřadném odporu. Ze známého napájecího napětí a úbytku na předřadném rezistoru je dopočítána vodivost roztoku, z které je stanovena jeho konduktivita.

Tento způsob měření se z hlediska nároků kladených na přesnost měření EC živného roztoku ukázal jako dostačující. Pulsním buzením odporového děliče je potlačen nepříznivý vliv polarizace, a tím je jednak prodloužena životnost elektrod a jednak jsou sníženy nároky na častou kalibraci toho snímače z důvodu zachování jeho přesnosti.

2.5.4 Návrh snímače EC

K návrhu snímače konduktivity bylo přistoupeno zejména z důvodu vysoké ceny těchto snímačů a jejich převodníků. Cena takového kompletu se na českém trhu pohybuje od 5 tisíc nahoru.

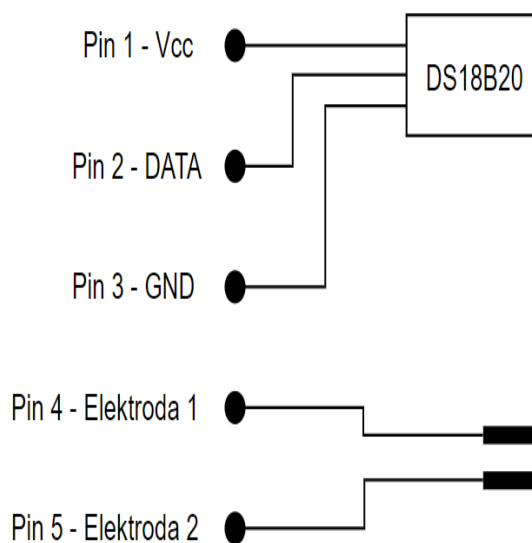
Při návrhu bylo dbáno na voděodolnost a kompaktní rozměr výsledného snímače. Jako materiál pro výrobu elektrod byla zvolena grafitová fólie. Ta se vyznačuje nízkým měrným odporem a vysokou odolností vůči chemickým roztokům. Tělo čidla bylo navrženo pomocí programu FreeCAD a vytištěno pomocí 3d tiskárny. Součástí snímače je také čidlo teploty DS18B20, které umožňuje teplotní kompenzaci při kalibraci.

Sadou měření byla konstanta snímače stanovena jako $k = 10,41 \text{ cm}^{-1}$. Pokud budeme předpokládat změnu konduktivity v rozsahu 0,1 až 2,5 mS/cm, tak se bude hodnota odporu snímače pohybovat v intervalu 4,164 až 104,1 k Ω . Jelikož byl zvolen předřadný rezistor o hodnotě 805 Ω a budící napětí činí 5 V, tak se bude úbytek napětí na předřadném rezistoru pohybovat v rozsahu 0,037 až 0,81 V. Z těchto uvedených údajů lze stanovit rozlišení výsledného měření konduktivity, které činí:

$$r = \frac{(\kappa_{MAX} - \kappa_{MIN})}{(U_{MAX} - U_{MIN})} \cdot \frac{U_A}{2^N} = \frac{(2,5 - 0,1)}{(0,81 - 0,037)} \cdot \frac{4,096}{2^{16}} = 1,94 \cdot 10^{-4} \text{ mS/cm} \quad (2.7)$$



Obrázek 2.19: Prototyp EC snímače



Obrázek 2.20: Zapojení snímače EC

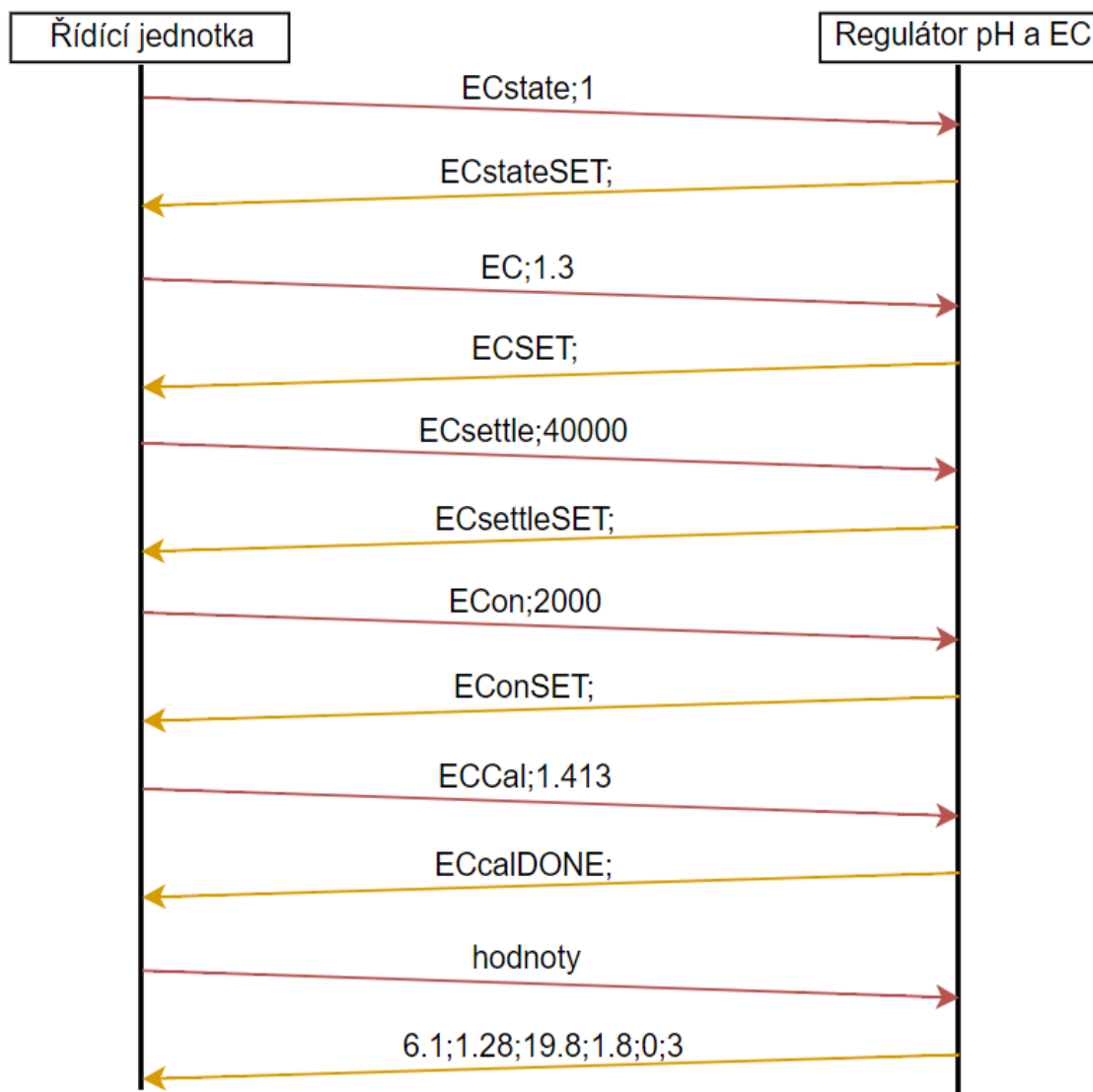
2.5.5 Komunikace

Ovládání regulátoru a nastavení jeho jednotlivých parametrů je zajištěno pomocí sériového komunikačního protokolu UART. Symbolová rychlost tohoto protokolu je na straně regulátoru nastavena na 9600 Bd.

Jednotlivé zprávy této komunikace jsou koncipovány jako textové řetězce, přičemž konec zprávy označuje znak nového řádku „\n“. U většiny těchto zpráv je nejprve uveden název nastavovaného parametru, za kterým následuje středníkem oddělená hodnota pro tento parametr. Pro základní nastavení a vyčítání dat z regulátoru byly vytvořeny následující typy zpráv (parametr *Val* za středníkem představuje hodnotu nastavovaného parametru):

- ECstate;Val – tato zpráva umožňuje zapínat a vypínat regulaci EC. Parametr val tedy nabývá hodnoty 0 (zapnout regulaci) a 1 (vypnout regulaci). Na tuto zprávu regulátor odpovídá textovým řetězcem "ECstateSET;\n".
- EC;Val – pomocí této zprávy se nastavuje žádaná hodnota EC. Hodnota EC je udána v mS/cm. Na tuto zprávu regulátor odpovídá textovým řetězcem "ECSET;\n".
- ECsettle;Val – touto zprávou lze nastavit čas ustálení hodnoty EC mezi jednotlivým dávkováním minerálního hnojiva. Čas ustálení je vyjádřen v ms. Na tuto zprávu regulátor odpovídá textovým řetězcem "ECSET;\n".
- ECon;Val – zpráva určená pro nastavení času dávkování minerálního hnojiva. Čas dávkování je vyjádřen v ms. Na tuto zprávu regulátor odpovídá textovým řetězcem "EConSET;\n".
- ECcal;Val – pomocí této zprávy je umožněno kalibrovat EC sondu. Za středníkem následuje hodnota konduktivity kalibrační tekutiny při 25°C. Při dokončení kalibrace je zaslána odpověď v podobě textového řetězce "ECcalDONE;\n".
- hodnoty – touto zprávou je přivedena žádost o zaslání hodnot naměřených regulátorem. Odpověď na tuto zprávu je tvořena šesti hodnotami datového typu double oddělenými pomocí středníku. Tyto hodnoty jsou udány v následujícím pořadí „Aktuální hodnota pH; Aktuální hodnota EC; Aktuální hodnota teploty živného roztoku; Objem dávky čerpadla P₃; Objem dávky čerpadla P₄; Objem dávky čerpadla P₅“.
- Zprávy pro nastavení parametrů pH regulátoru jsou shodné jako u EC regulátoru pouze s tím rozdílem, že je v textovém řetězci "EC" nahrazeno za "pH".

Regulátor je s řídicí jednotkou aeroponického systému propojen pomocí USB kabelu. Ukázka komunikace mezi řídicí jednotkou Raspberry Pi a regulátorem pH a EC je znázorněna na následujícím obrázku.



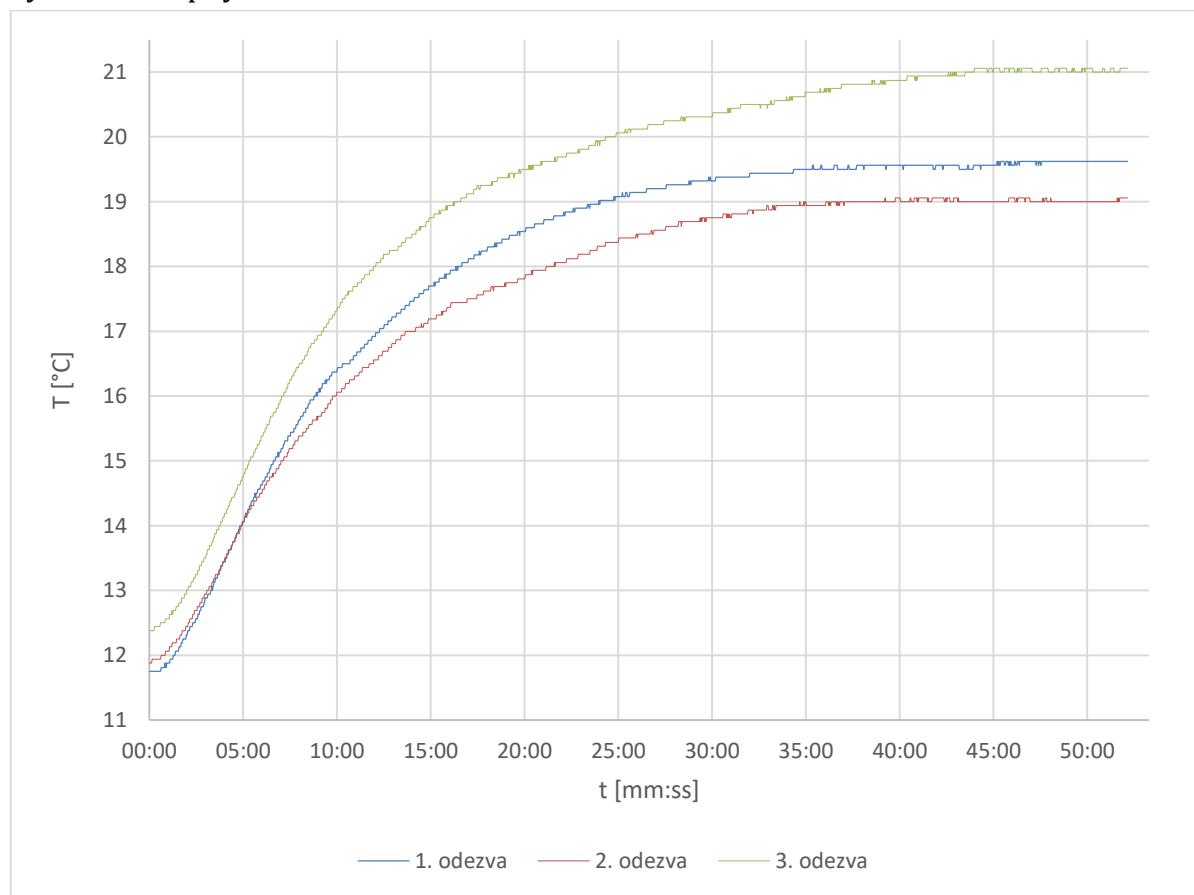
Obrázek 2.21: Ukázka komunikace mezi regulátorem a řídicí jednotkou

2.6 Návrh regulátoru teploty

Jeden ze základních požadavků na výsledný aeroponický systém je diskrétní regulace teploty v pěstební části. Pro realizaci takového regulátoru je nejdříve nutné stanovit přenos soustavy, na který se nadále navrhne požadovaný typ regulátoru pomocí dané metody. U tepelné soustavy se předpokládá alespoň soustava druhého řádů s velkými časovými konstantami. Z toho důvodu byla pro stanovení přechodové charakteristiky systému vybrána Strejcova aproximační metoda.

2.6.1 Přechodová charakteristika systému

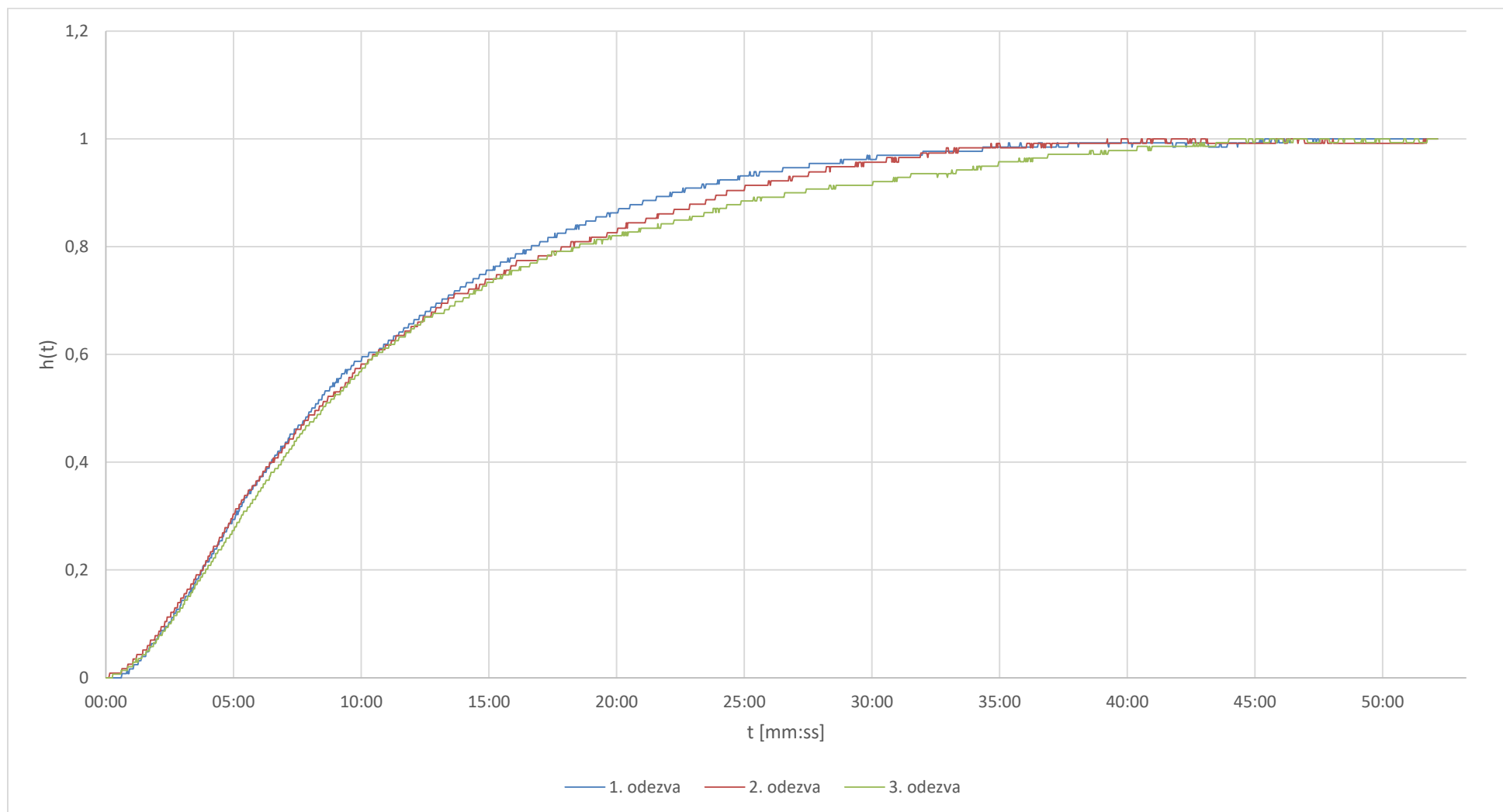
Pro různé okolní podmínky (teplota, vlhkost aj.) byly změřeny tři odezvy systému na jednotkový skok. Jednotkový skok byl realizovaný přivedením maximálního výkonu na topný člen.



Obrázek 2.22: Naměřené odezvy systému

Naměřené charakteristiky je nadále třeba přepočítat do intervalu 0–1, čímž získáme odezvu systému na jednotkový skok. Normalizace charakteristiky se realizuje dle následujícího vzorce:

$$y'(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)} \quad (2.8)$$



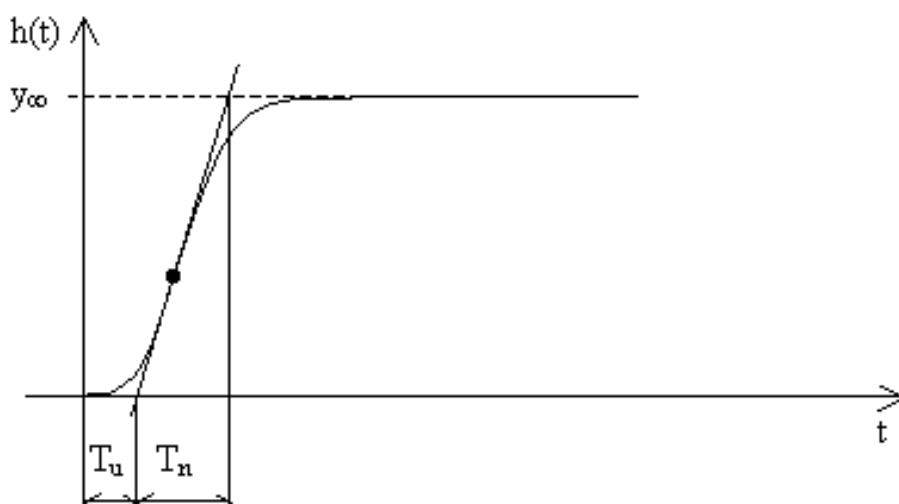
Obrázek 2.23: Normalizované odezvy systému

2.6.2 Identifikace soustavy

Jelikož soustava vykazuje odezvu aperiodického průběhu, lze ji aproximovat pomocí proporcionální soustavy 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami nebo proporcionální soustavou n-tého řádu se shodnými časovými konstantami. Volba aproximační soustavy závisí na velikosti parametru časové konstanty τ , která je dána následovně [20]:

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} \quad (2.9)$$

kde je: T_u Doba průťahu [s]
 T_n Doba náběhu [s]



Obrázek 2.24: Přechodová charakteristika s aperiodickým průběhem a s vyznačenou dobou náběhu a dobou průťahu [20]

V případě, že je hodnota parametru τ menší než 0,1, jako aproximační soustavu volíme proporcionální soustavu 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami. Pokud parametr τ nabývá hodnoty větší nebo rovné 0,1, bude mít aproximační soustava přenos proporcionální soustavy n-tého řádu s rozdílnými časovými konstantami. Tvary aproximačních soustav jsou následující [20]:

$$\tau < 0,1 \rightarrow \text{Aproximační soustava ve tvaru : } F(p) = \frac{K}{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)}$$

$$\tau \geq 0,1 \rightarrow \text{Aproximační soustava ve tvaru : } F(p) = \frac{K}{(T \cdot p + 1)^n}$$

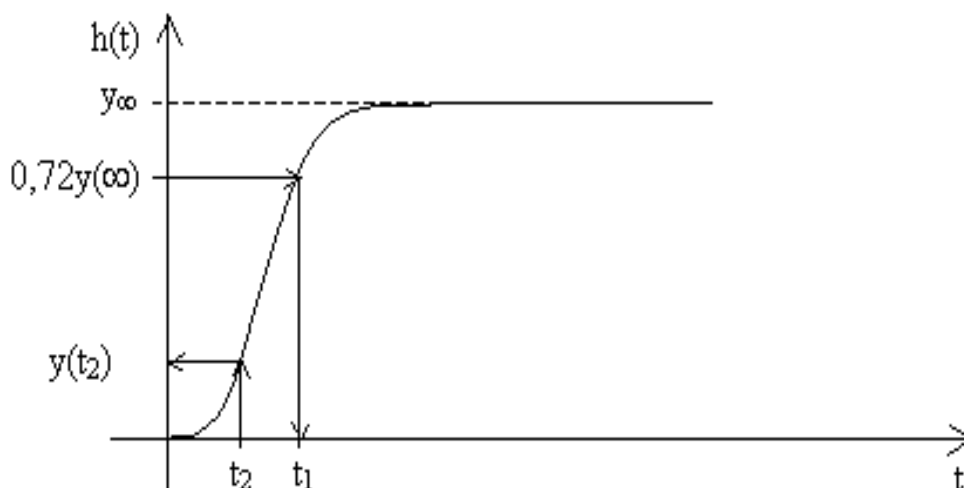
Z průběhu přechodové charakteristiky systému byla odečtena přibližná hodnota doby průtahu $T_u = 58$ s a doby náběhu $T_n = 935$ s. Z těchto hodnot byl nadále stanoven parametr τ :

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} = \frac{58}{935} = 0,062 \text{ s} \quad (2.10)$$

Jelikož je výsledný parametr τ menší než 0,1, bude přenos aproximační soustavy zvolen ve tvaru:

$$F(p) = \frac{K}{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)} \quad (2.11)$$

Jednotlivé konstanty přenosu aproximační soustavy jsou určeny následujícím způsobem (ukázkový výpočet pro hodnoty 1. odezvy přechodové charakteristiky systému):



Obrázek 2.25: Aproximace proporcionální soustavou 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami [20]

Nejprve je stanoveno zesílení systému pomocí vzorce:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{1 - 0}{1 - 0} = 1 \quad (2.12)$$

Dále se z přechodové charakteristiky odečte časový okamžik t_1 pro hodnotu $h(t) = 0,72$, pomocí kterého se stanoví součet časových konstant T_1 a T_2 dle vztahu:

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564} = \frac{831}{1,2564} = 661,41 \text{ s} \quad (2.13)$$

Časový okamžik t_2 je dán vztahem:

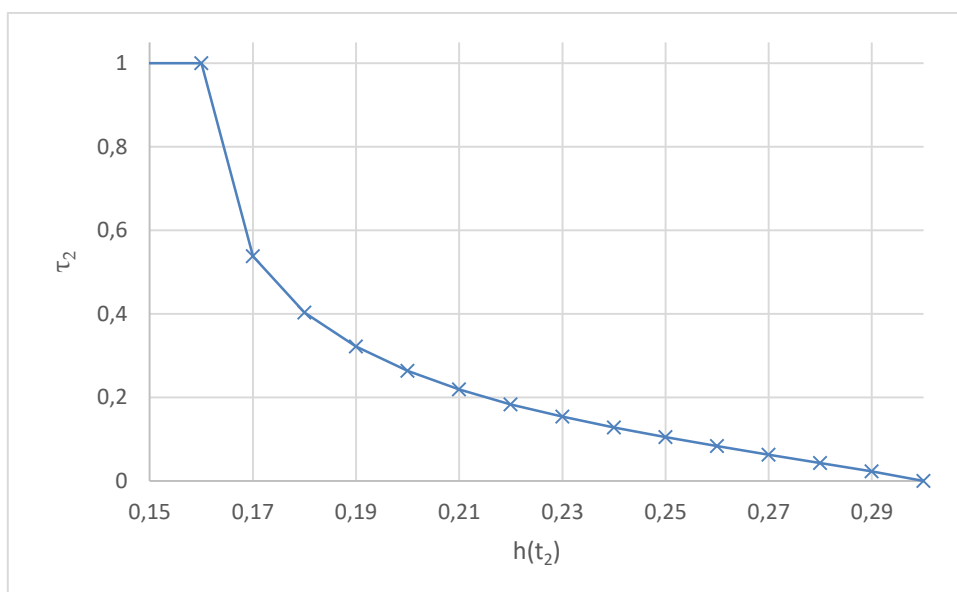
$$t_2 = 0,3574 \cdot (T_1 + T_2) = 0,3574 \cdot 661,41 = 236,4 \text{ s} \quad (2.14)$$

Pro vypočtený časový okamžik t_2 se nadále stanoví jeho odpovídající hodnota $h(t_2)$:

$$h(t_2) = 0,215 \quad (2.15)$$

Podle níže uvedené grafické závislosti je určen poměr časových konstant τ_2 , který dán následovně:

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} = 0,201 \quad (2.16)$$



Obrázek 2.26: Závislost parametru τ_2 na hodnotě přechodové charakteristiky v časovém okamžiku t_2

Pomocí známého poměru τ_2 a časového okamžiku t_1 jsou stanoveny časové konstanty T_1 a T_2 následujícím způsobem:

$$T_2 = \frac{t_1}{1,2564 \cdot (1 + \tau_2)} = \frac{831}{1,2564 \cdot (1 + 0,201)} = 550,7 \quad (2.17)$$

$$T_1 = \tau_2 \cdot T_2 = 0,201 \cdot 550,7 = 110,7 \quad (2.18)$$

V následujících tabulkách jsou uvedeny zjištěné parametry pro všechny měřené odezvy:

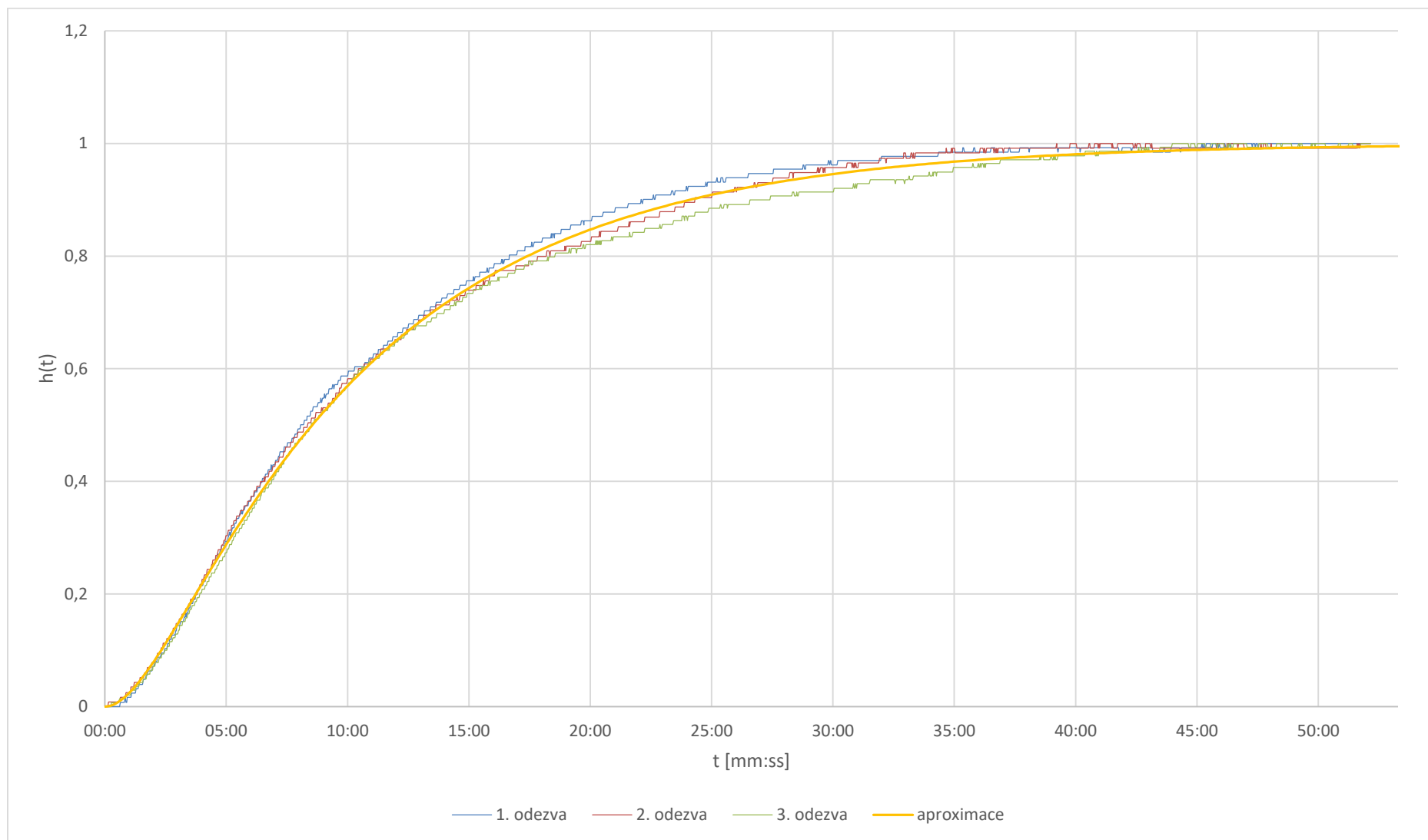
Tabulka 2.17: Zjištěné parametry pro jednotlivé odezvy

$h(t)$	t_1 [s]	T_1+T_2	t_2 [s]	$h(t_2)$
1. odezva	831	661,41	236,4 (3:56)	0,215
2. odezva	853	678,92	242,7 (4:03)	0,23
3. odezva	885	704,39	251,8 (4:12)	0,222

Tabulka 2.18: Časové konstanty a výsledné přenosy jednotlivých odezev

$h(t)$	τ_2	T_1	T_2	$F_s(p)$
1. odezva	0,201	110,7	550,7	$\frac{1}{(110,7 \cdot p + 1)(550,7 \cdot p + 1)}$
2. odezva	0,154	90,6	588,3	$\frac{1}{(90,6 \cdot p + 1)(588,3 \cdot p + 1)}$
3. odezva	0,1772	106	598,4	$\frac{1}{(106 \cdot p + 1)(598,4 \cdot p + 1)}$
Průměr	-	102,4	579,2	$\frac{1}{(102,4 \cdot p + 1)(579,2 \cdot p + 1)}$

Časové konstanty použité pro výsledný přenos soustavy byly určeny z průměru jednotlivých parametrů. Pro ověření správnosti výpočtů byla pomocí MATLABu vykreslena odezva aproximované soustavy na jednotkový skok žádané veličiny. Srovnání této aproximace s jednotlivými naměřenými odezvami je uvedeno na obrázku 2.27.

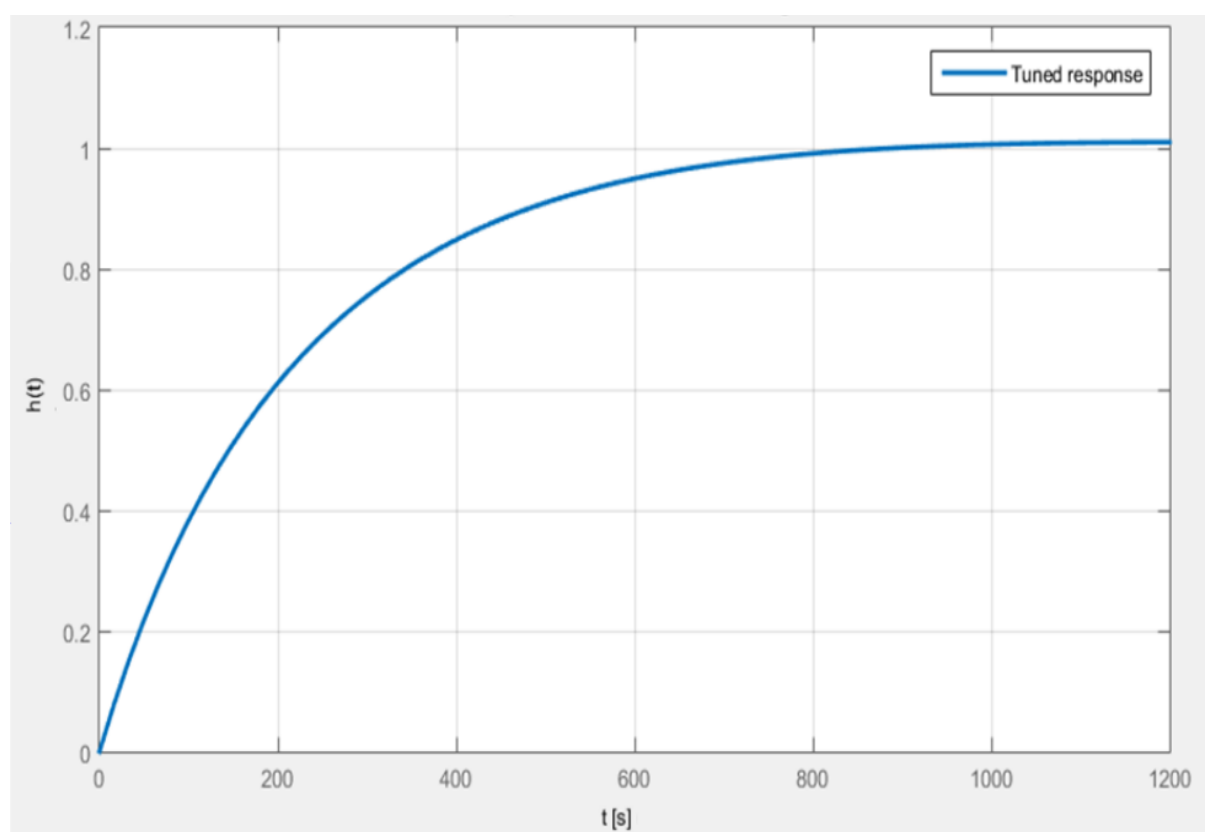


Obrázek 2.27: Srovnání získané aproximace a jednotlivých odezev

2.6.3 Návrh PID regulátoru

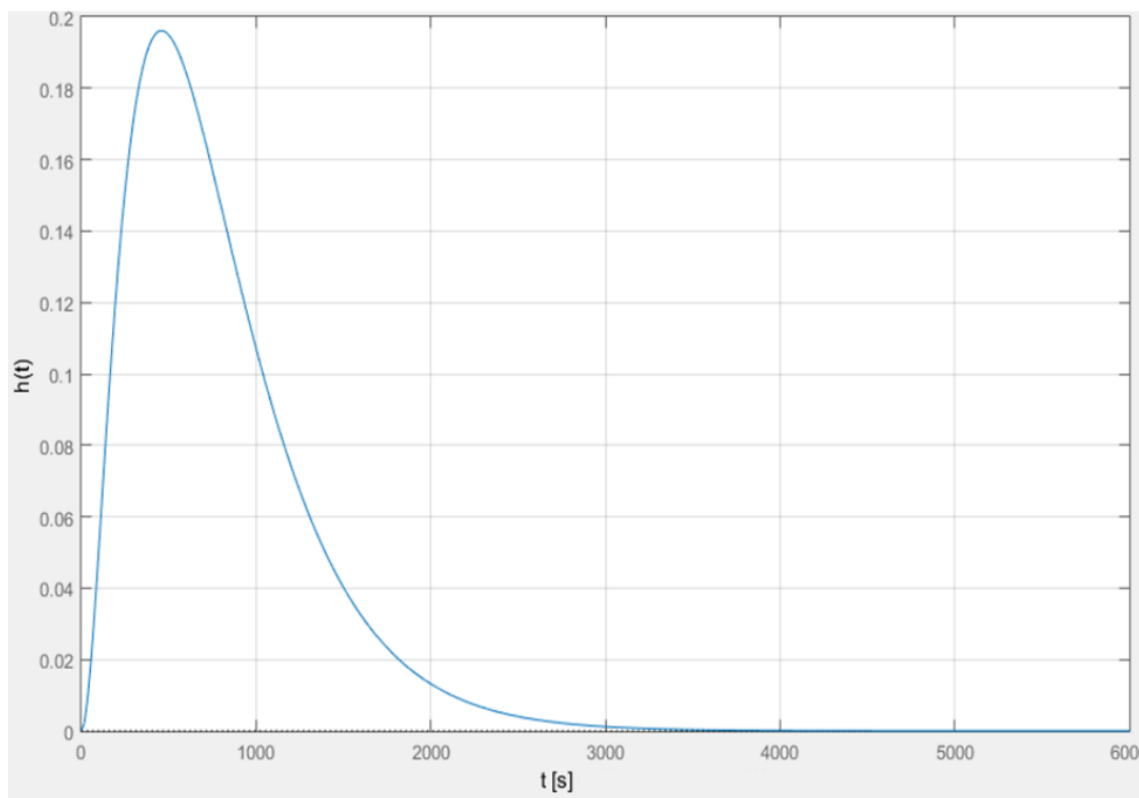
Pro výpočet jednotlivých parametrů PID regulátoru bylo použito návrhové prostředí pidTuner v programu MATLAB. Toto prostředí umožňuje jednoduchý návrh regulátoru za pomoci požadovaného tvaru průběhu odezvy přenosu řízení na jednotkový skok žádané veličiny. Pomocí dvou posuvníků lze tedy nastavit rychlost dosažení žádané veličiny a velikost překmitu.

Vlivem vzorkovací periody 5s byl přenos soustavy zpožděn o 2,5 s pomocí Padého rozvoje. Návrh byl uskutečněn tak, aby bylo dosažení žádané veličiny co nejrychlejší, a přitom překmit co nejmenší. Výsledný regulátor bude implementovaný v paralelním tvaru, proto byly jednotlivé parametry odečteny ve formě zesílení proporcionální, integrační a derivační složky. Jejich hodnoty jsou $K_p = 3,12$, $K_i = 0,005155$ a $K_d = 299,1$. Při tomto nastavení parametrů bylo dosaženo fázové bezpečnosti $86,7^\circ$ a amplitudové bezpečnosti 38,4 dB. Na následujícím obrázku můžeme vidět přechodovou charakteristiku přenosu řízení. Z ní lze vyčíst, že 90 % z žádané hodnoty je dosaženo již po 485 sekundách.



Obrázek 2.28: Přechodová charakteristika přenosu řízení

Při případné poruše působící na vstupu soustavy je regulátor schopen tuto poruchu plně potlačit do 4000 sekund. Přechodová charakteristika přenosu poruchy je uvedena na následujícím obrázku.



Obrázek 2.29: Přechodová charakteristika přenosu poruchy

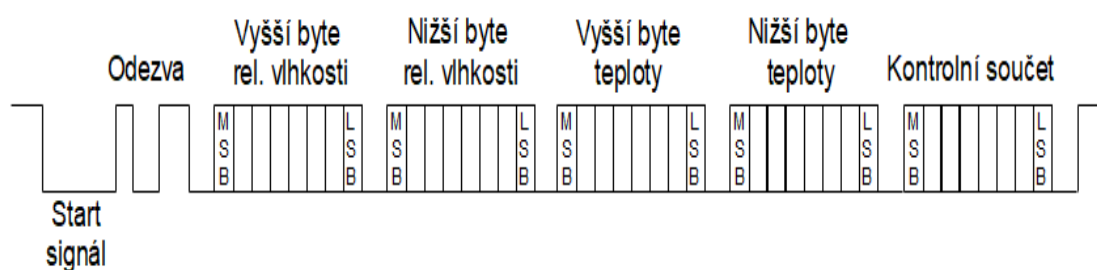
2.7 Dílčí procesy systému

V této podkapitole jsou popsány hlavní procesy sloužící k automatizaci aeroponického systému. Tyto procesy byly vytvořeny na základě požadavků na výsledný aeroponický systém.

2.7.1 Čtení hodnot z DHT21

Z důvodu absence veřejné knihovny, která by umožňovala vyčítání dat z čidla DHT21 pomocí funkcí knihovny wiringPi.h, musely být vytvořeny funkce, které komunikaci s tímto čidlem umožňují. Tyto funkce byly v závěru implementovány do knihovny s názvem dht21. Komunikace s čidlem je zprostředkována pomocí sériového komunikačního protokolu Single-bus, jehož struktura je uvedena na obrázku 2.30. Z tvaru této struktury a jednotlivých časových intervalů log. „0“ a log. „1“ uvedených výrobcem byla vytvořena funkce, která zahájí komunikaci s čidlem, ze kterého následně přijme 5 bytů. První dva byty nesou informaci o naměřené rel. vlhkosti. Další dva bajty představují hodnotu naměřené teploty vynásobenou deseti, přičemž nastavený bit s nevyšší váhou (MSB) u vyššího bytu nesoucího hodnotu teploty představuje záporné znaménko. Poslední byte představuje kontrolní součet vytvořený z předešlých bytů.

Hodnoty měřené tímto čidlem lze získat pomocí funkce `dht21()`, jejíž jediný argument tvoří hodnota definující index daného GPIO pinu, ke kterému je připojen datový vodič čidla. Návrátová hodnota této funkce je tvořena strukturou *sensor*, která v sobě obsahuje hodnotu naměřené teploty a rel. vlhkosti.



Obrázek 2.30: Struktura komunikačního protokolu Single-bus pro čidlo DHT21

2.7.2 ON/OFF Regulace vlhkosti

Pro implementaci regulace vlhkosti v pěstebním prostoru byla vytvořena jednoduchá funkce představující dvoustavový regulátor s hysterezí. Tato funkce je volána, pouze pokud je regulace vlhkosti povolena. Při volání této funkce se pomocí argumentu *set_hum* předává žádaná hodnota rel. vlhkosti. Argument *hum* představuje aktuální hodnotu rel. vlhkosti a argument *hys*, s defaultní hodnotou 5, představuje hysterezi. Před samotnými podmínkami realizujícími regulaci je provedeno několik kontrol těchto argumentů, jelikož relativní vlhkost může nabývat hodnot pouze 0 až 100 %. Pokud se tedy žádaná hodnota rel. vlhkosti vzduchu s ohledem na hysterezi nenachází v uvedeném intervalu, je upravena tak, aby byla zajištěna funkčnost dvoustavového regulátoru s hysterezí.

```
void hum_regulation(double set_hum, double hum, double hys = 5)
{
    if (set_hum > 99)
        set_hum = 99;
    else if (set_hum < 1)
        set_hum = 1;
    if (hys < 0 || hys > 30)
        hys = 5;
    if (set_hum + hys > 99)
        set_hum = 99 - hys;
    else if (set_hum - hys < 1)
        set_hum = 1 + hys;
    if (hum < (set_hum - hys)) { digital_toggle(RL6, 1); digital_toggle(RL1, 1); }
    if (hum > (set_hum + hys)) { digital_toggle(RL6, 0); digital_toggle(RL1, 0); }
}
```

Obrázek 2.31: Ukázka kódu dvoustavové regulace s hysterezí

2.7.3 PID Regulace teploty

Pro PID regulaci teploty byla použita knihovna *pid.h*, jež je veřejně dostupná z webového portálu github.com. Tato knihovna umožňuje implementaci PID regulátoru v jazyce C++. Parametry regulátoru jsou nastaveny pomocí jednotlivých zesílení proporcionální, integrační a derivační složky.

V případě, že je přiveden požadavek na regulaci teploty, je spuštěn cyklický časovač s periodou 5 sekund, který při každém uplynutí tohoto intervalu volá funkci, v které je nejdříve zjištěna aktuální hodnota teploty v pěstební prostoru. Tato hodnota je spolu s žádanou teplotou předána funkci *calculate()* z knihovny *pid.h*, která stanoví akční zásah regulátoru, jenž je přiváděn na vstup soustavy. Akční zásah je omezen na interval 0 až 100, z kterého je následně přepočítán do intervalu 0 až 1024, což odpovídá rozsahu PWM výstupu.

Vzorkovací perioda regulátoru je omezena zejména periodou vyčítání dat z čidla DHT21, která činí 2 s. Proto bude v budoucnu pro zpětnou vazbu regulační smyčky použito čidlo DS18B20, jež umožňuje vyčítat aktuální teplotu každé 2 ms.

2.7.4 Regulace pH a EC

Regulace pH a EC je zajištěna pomocí peristaltických čerpadel, jež dávkují příslušné kapaliny ovlivňující tyto parametry živného roztoku. Princip této regulace spočívá v postupném dávkování jednotlivých kapalin. Pokud je přiveden například požadavek k regulaci EC, přičemž aktuální hodnota EC živného roztoku je menší než žádaná, dochází k sepnutí peristaltického čerpadla dávkujícího minerální hnojivo. Toto čerpadlo je sepnuto jen po určitou dobu, jejíž délku lze libovolně nastavit. Po uplynutí této doby dávkování přichází doba ustálení, během které je regulace EC zakázána. Tato doba ustálení slouží k tomu, aby mělo dávkované minerální hnojivo dostatečný čas na rovnoměrné rozložení v živném roztoku. Jakmile doba ustálení uplyne, je regulace opět povolena a zjišťuje se, zda byla dávka minerálního hnojiva natolik dostatečná, aby EC živného roztoku bylo větší nebo rovno žádané hodnotě. V případě, že dávka dostačující nebyla, se celý proces znova opakuje.

Jelikož není nutné parametry živného roztoku navyšovat okamžitě, je vhodné dobu dávkování nastavit co nejmenší a naopak dobu ustálení co největší. Tímto nastavením jednotlivých dob je zajištěno, že hodnota regulovaného parametru výrazně nepřekročí jeho žádanou hodnotu. Tento způsob regulace také eliminuje vliv dopravního zpoždění, které představuje hadička vedoucí od peristaltického čerpadla do živného roztoku.

2.7.5 Spouštění čerpadla

Membránové čerpadlo slouží jak pro vytváření aerosolu, tak pro promíchávání živného roztoku. Obě tyto funkčnosti byly programově implementovány tak, aby mohli v případě potřeby probíhat současně.

Pokud je požadováno vytváření aerosolu, je spuštěn cyklický časovač s periodou 5 minut, při jehož každém uplynutí je volána funkce, která slouží ke spuštění membránového čerpadla a příslušného elektromagnetického ventilu. Nejprve je aktivován elektromagnetický ventil a se zpožděním 1 s je aktivováno membránové čerpadlo. To je aktivní po defaultně nastavenou dobu 5 sekund (tento čas lze měnit pomocí argumentu funkce) přičemž po uplynutí této doby je vyhodnoceno, zda aktuálně neprobíhá promíchávání živného roztoku. Pokud promíchávání probíhá, tak je vypnut pouze elektromagnetický ventil EV₂, a o vypnutí čerpadla se postará funkce realizující promíchávání. Pokud promíchávání neprobíhá, je nejprve vypnut ventil EV₂, a se zpožděním půl sekundy je deaktivováno i membránové čerpadlo.

Při požadavku na promíchávání je princip spouštění čerpadla a elektromagnetického ventilu analogický k principu popsanému v předešlém odstavci. Čas určený k promíchávání živného roztoku je nastaven na 2 minuty každých 20 minut.

2.8 Software a programování

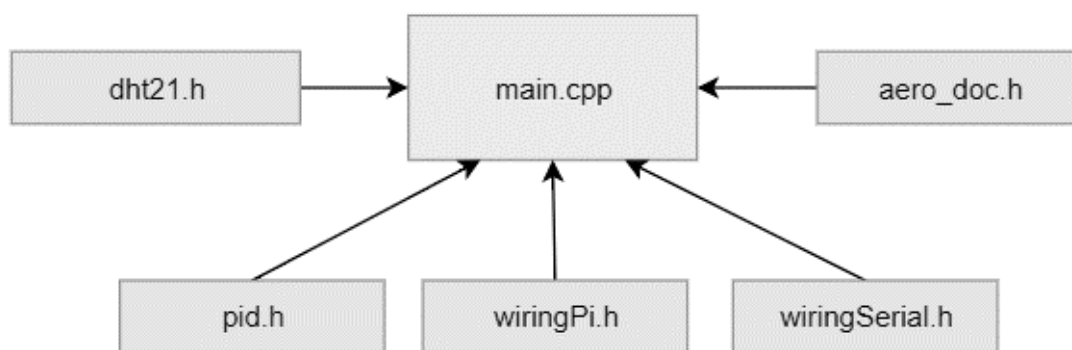
Volba softwaru použitého k programování mikropočítače Raspberry Pi byla ovlivněna požadavkem na použití programovacího jazyka C++. Pro návrh uživatelského prostředí bylo zvoleno prostředí Qt Creator. K programování platformy Arduino bylo použito oficiální vývojové prostředí Arduino IDE.

2.8.1 Visual Studio 2017

K naprogramování jednotlivých procesů sloužících k automatizaci aeroponického systému bylo vybráno návrhové prostředí Visual Studio 2017. K plné podpoře programování platformou založených na linuxovém jádře bylo nainstalováno rozšíření Visual GDB. Mezi hlavní přednosti tohoto rozšíření se řadí synchronizace použitých knihoven s cílovým zařízením, ladění programu v reálném čase a SSH komunikace. Pro ovládání jednotlivých rozhraní mikropočítače Raspberry Pi byla zvolena knihovna wiringPi, jež je veřejně dostupná z webového portálu github.com.

Většinu naprogramovaných procesů, jako je například PID regulace teploty, vyčítání hodnot ze senzorů nebo ovládání čerpadla, bylo nutné umístit do cyklické smyčky. Dále byl také stanoven požadavek na současné vykonávání těchto smyček. K tomu byly použity časovače, jež jsou propojeny s danou funkcí, kterou při každém dočasování volají. Jelikož se časovač vytváří na dostupném vlákně procesoru, je možné zajistit současný běh několika funkcí. Pro systém byly vytvořeny tři režimy provozu, jejichž popis je uvedený v podkapitole 2.9.4 (Sekce nastavení).

Při programování byly použity tři veřejně dostupné uživatelské knihovny (pid.h, wiringPi.h a wiringSerial.h) a dvě vytvořené knihovny, přičemž dht21.h slouží k implementaci čidla DHT21 a aero_doc.h obsahuje definice pinů, ke kterým jsou připojeny jednotlivé periferie.



Obrázek 2.32: Schéma použitých uživatelských knihoven

2.8.2 Qt Creator

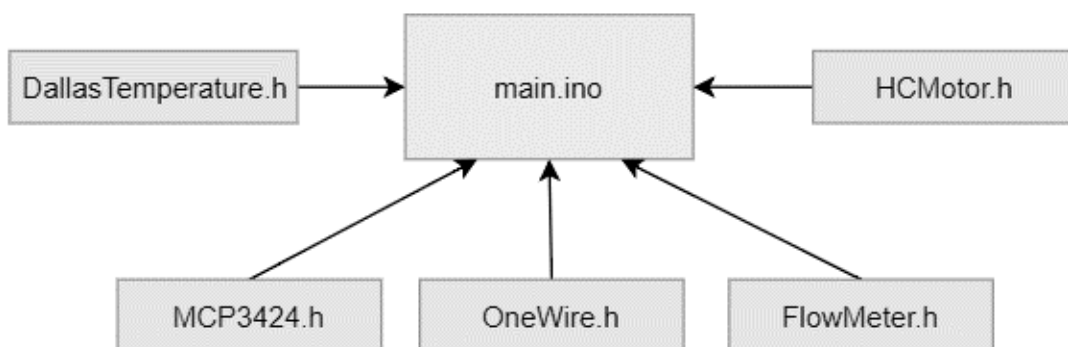
Pro vytvoření uživatelského rozhraní bylo použito návrhové prostředí Qt Creator. V tomto prostředí je možné vytvářet grafické rozhraní jednoduchým skládáním funkčních prvků (widgetů) do hierarchie oken, skupin a panelů. Příslušné widgety pak lze programově propojit s požadovanou událostí (kliknutí, najetí kurzoru myši aj.). Výsledná struktura návrhu grafického rozhraní je popsána v deklarativním jazyce QML.

Při vytváření uživatelské prostředí byl vzhled jednotlivých widgetů a oken nastaven pomocí kaskádového stylu CSS. Výsledný vzhled navrženého GUI byl zvolen tak, aby byla zachována bezproblémová čitelnost jednotlivých parametrů a zároveň aby byla spotřeba dotykového displeje co nejmenší. Jedná se tedy o světle šedé písmo na tmavě šedém pozadí.

2.8.3 Arduino IDE

Toto vývojové prostředí umožňuje programování platformy Arduino za pomoci programovacího jazyka Wiring. Ten vychází z programovacího jazyka C++ a je koncipován tak, aby bylo jeho použití snadné i pro nezkušené programátory. Pro úspěšné nahrání vytvořeného programu stačí v tomto prostředí zvolit použitý typ platformy a komunikační port, ke kterému je tato platforma připojena.

O ovládání výkonu jednotlivých peristaltických čerpadel pomocí PWM výstupu se starají funkce z knihovny HCMotor. Knihovna MPC3424 slouží pro implementaci komunikace s použitým A/D převodníkem pomocí sběrnice I²C. K měření teploty pomocí čidla DS18B20 je použita knihovna OneWire, která slouží k implementaci sériového komunikačního protokolu 1-Wire, a knihovna DallasTemperature, jež se stará o samotné vyčítání dat z čidla. Pro měření průtoků a objemů dávkovaných kapalin pomocí průtokoměrů YF-S401 jsou použity funkce z knihovny FlowMeter.h. Všechny tyto uvedené knihovny jsou veřejně dostupné z webového portálu github.com. Vývojový diagram vytvořeného programu je uveden v příloze.



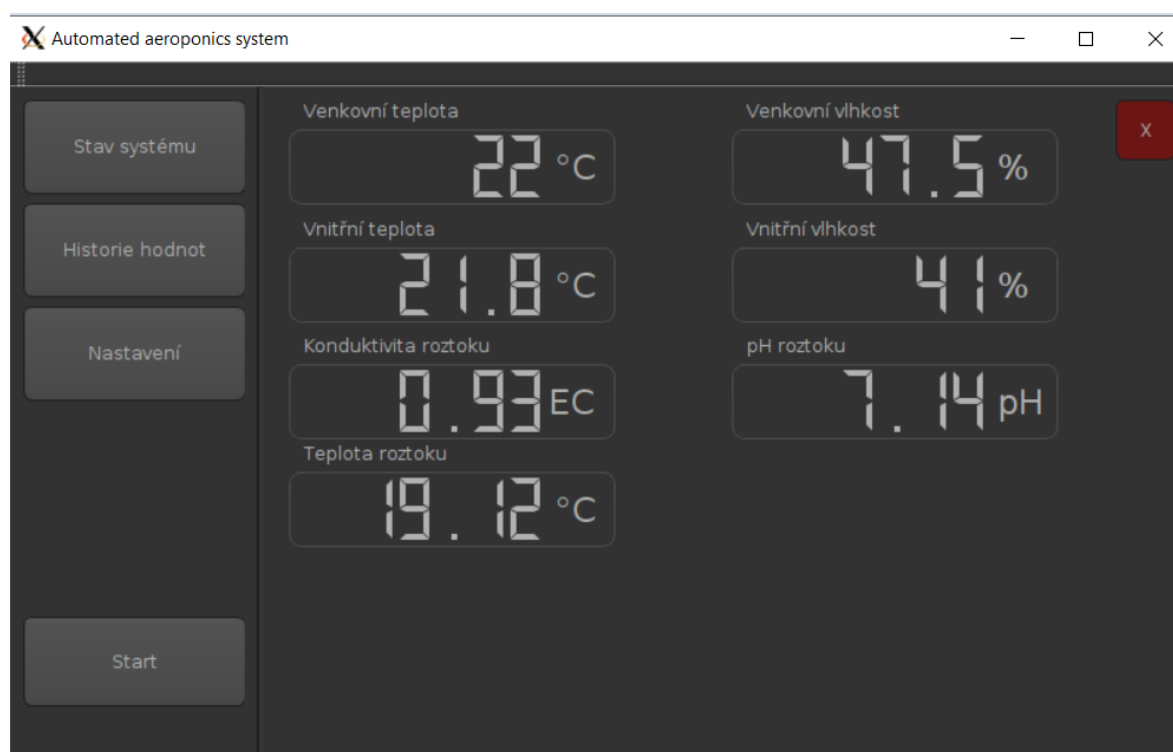
Obrázek 2.33: Schéma použitých knihoven v Arduino IDE

2.9 Uživatelské rozhraní

Nastavení parametrů a jednotlivých funkcí systémů je umožněno pomocí uživatelského rozhraní, jež bylo vytvořeno v návrhovém prostředí Qt Creator. Pomocí tohoto rozhraní je dále umožněno sledovat aktuální hodnoty parametrů systému a v případě nutnosti lze zobrazit i jejich historii. Jednotlivé části rozhraní jsou uzpůsobeny tak, aby bylo zajištěno jeho snadné ovládání pomocí dotykového displeje.

2.9.1 Úvodní obrazovka

Při spuštění aplikace se jako první zobrazí úvodní obrazovka. Ta slouží jako rozcestník do jednotlivých sekcí a dále je na ní uveden přehled o aktuálních hodnotách nejdůležitějších parametrů systému. Z této obrazovky lze celou aplikaci jednoduše ukončit pomocí červeného tlačítka s křížkem umístěného v pravém horním rohu.



Obrázek 2.34: Úvodní obrazovka

2.9.2 Sekce stav systému

Tato sekce umožňuje dohled nad všemi zařízeními a parametry jednotlivých částí systému. Je rozdělena do tří ohraničených oblastí, které se vždycky pojí s určitou částí systému. Hodnota „ON“ značí, že je daný prvek systému aktivní, a naopak hodnota „OFF“ indikuje neaktivní stav prvku.

První oblast je pojmenována „Nádrž s roztokem“. V ní lze sledovat aktuální stav membránového čerpadla, elektromagnetických ventilů a hladinových snímačů v nádrži s živným roztokem. Jsou zde také zobrazeny hodnoty získané z regulátoru pH a EC.

Druhá oblast nese název „Nádrž s vodou“. Zde je indikován stav odstředivého čerpadla, hladinového snímače a elektromagnetického ventilu umístěného v rezervoáru s pitnou vodou.

Poslední oblast je pojmenována „Pěstební prostor“. V ní jsou uvedeny údaje o stavu jednotlivých zařízení spojených s teplotní a vlhkostní regulací. Dále zde nalezneme údaje o aktuálních hodnotách teploty a vlhkosti v pěstebním prostoru.

Nádrž s roztokem						
Stav čerpadla P1:	OFF	Regulace pH:	ON	Žádané pH:	6	pH
Stav EV2:	OFF	Regulace EC:	ON	Žádané EC:	1.1	mS/cm
Stav EV3:	OFF	Dávka P3:	0	Aktuální pH:	6.44	pH
Stav LS-MAX:	ON	Dávka P4:	0.03	Aktuální EC:	1.09	mS/cm
Stav LS-MIN:	ON	Dávka P5:	0.01	Teplota roztoku:	18.5	°C

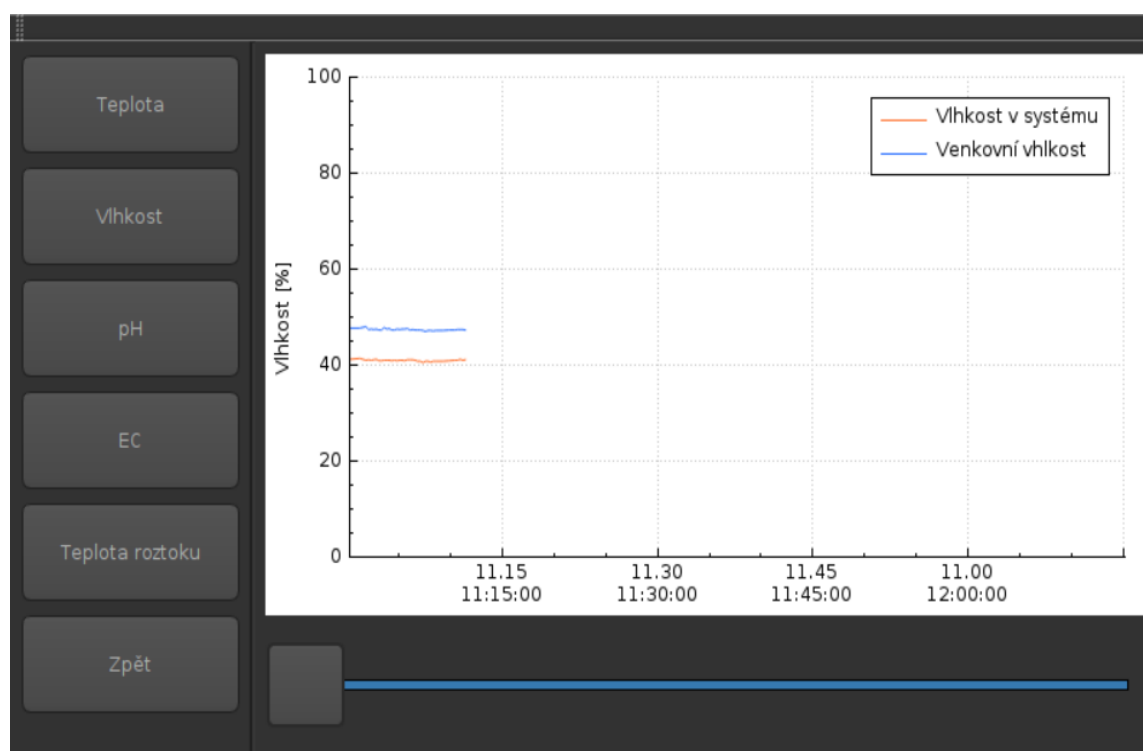
Nádrž s vodou		Pěstební prostor				
Stav čerpadla:	OFF	Regulace teploty:	ON	Žádaná teplota:	20	°C
Stav EV1:	OFF	Regulace vlhkosti:	ON	Žádaná vlhkost:	95	%
Stav LS-MAX:	OFF	Ventilátor F1:	ON	Aktuální teplota:	21.9	°C
		Ventilátor F2 :	ON	Aktuální vlhkost:	41.4	%
		UM:	ON	Venkovní teplota:	22.2	°C
		Výkon topení:	0	Venkovní vlhkost:	21.9	%

Zpět

Obrázek 2.35: Sekce stav systému

2.9.3 Sekce historie hodnot

Tato sekce umožňuje dohled nad vývojem hodnot jednotlivých parametrů v čase. Historie hodnot těchto parametrů je zobrazena pomocí grafických průběhů, které se vykreslují kontinuálně. Grafické průběhy jsou k dispozici pro hodnoty z čidel DHT21 a pro pH, EC a teplotu živného roztoku. Maximální časový úsek zobrazovaných hodnot činí přibližně jednu hodinu. Veškeré naměřené hodnoty se zároveň ukládají do textového souboru, tudíž je možné hodnoty v požadovaném čase zpětně dohledat. Návrat na úvodní obrazovku je umožněn pomocí tlačítka „Zpět“.



Obrázek 2.36: Sekce historie hodnot

2.9.4 Sekce nastavení

Jednotlivé parametry systému lze upravovat v sekci nastavení. Zde je umožněno zvolit režim, ve kterém bude systém pracovat. Na výběr jsou tři různé režimy:

- **Manuální** – V tomto režimu je povoleno nastavování prvků obsažených v oblasti „Manuální režim“. V této oblasti lze nastavovat žádané hodnoty jednotlivých parametrů a časové intervaly regulace pH a EC (čas dávkování kapalin pro úpravu pH a EC, čas ustálení těchto hodnot). Hodnoty nastavovaných parametrů jsou uvedeny v základních jednotkách (teplota v °C, rel. vlhkost v %, časové intervaly v s). Dále je zde umožněno ovládání jednotlivých prvků systému a to pomocí tlačítek které zároveň indikují stav daného prvku.
- **Automatický** – Tento režim neumožňuje modifikaci jakýchkoliv parametrů. Tyto parametry jsou totiž defaultně nastaveny tak, aby bylo zajištěno optimální prostředí pro vegetativní rozmnožování.
- **Údržba** – Při přepnutí do tohoto režimu je celý systém ostaven. To znamená, že jednotlivé prvky systému jsou uvedeny do bezpečných stavů, při kterých lze provádět jejich údržbu.

V této sekci je také umožněno provádět kalibraci pH a EC sondy. Tato kalibrace se provádí pomocí kalibračních roztoků, jejichž hodnota je uvedena na popisku tlačítka.

The screenshot shows the 'Manuální režim' (Manual mode) settings screen. On the left, there are buttons for 'Kalibrace EC sondy (1.413 ms/cm)' and 'Kalibrace pH sondy (4.01 pH)'. Below these is a 'Výběr režimu' (Mode selection) section with three radio buttons: 'Manuální' (selected), 'Automatický', and 'Údržba'. At the bottom left is a 'Zpět' (Back) button. The main area is titled 'Manuální režim' and contains several adjustable parameters, each with a dropdown arrow, a numerical value, and an up/down arrow button:

Parameter	Value
Žádané pH:	6.00
Žádané EC:	1.10
Žád. teplota:	20.00
Žád. vlhkost:	95.00
Dávka pH:	1.00
Dávka EC:	1.00
Ustálení:	20.00

On the right side, there is a column of toggle switches for various system functions:

Function	Status
Rozprašování:	ON
Promíchávání:	ON
Regulace EC:	ON
Regulace pH:	ON
Regulace tep.:	OFF
Regulace vlhk.:	OFF
Topení:	ON
Zvlhčovač:	ON
Ventilátory:	ON

Obrázek 2.37: Sekce nastavení

2.10 Funkčnost a chybovost systému

Výsledný model aeroponického systému je plně funkční a jeho řízení splňuje zadané požadavky. Jednotlivé funkčnosti procesů navrženého systému byly odzkoušeny jak samostatně, tak souběžně a to bez zjištění jakýkoliv zásadních chyb. Zhodnocení celkové funkce aeroponického systému při reálném pěstování nebylo možné z časových důvodů uskutečnit. Jelikož jsou ale dílčí procesy systému plně funkční, tak je neúspěšnost při výsledném vegetativním rozmnožování, které probíhá zhruba 4 týdny, téměř vyloučena. Největší problém nastává pouze v případě výpadku elektrické energie, při kterém není možné napájet membránové čerpadlo, a tím vytvářet živný aerosol. Z toho důvodu by bylo vhodné systém rozšířit o záložní zdroj energie, který by tuto skutečnost eliminoval. Cena tohoto záložního zdroje by však neúměrně ovlivnila výslednou cenu systému.

Mezi další chyby systému je možné zařadit absenci zpětné vazby membránového čerpadla. Pokud se tedy čerpadlo porouchá, není možné tento stav indikovat. Proto bude do budoucna systém rozšířen o průtokový snímač, který se připojí na výstup tohoto čerpadla. V případě, že by byl přiveden požadavek na rozprašování nebo cirkulaci živného roztoku, byla by správná funkčnost čerpadla indikována skokovou změnou průtoku.

Výsledný prototyp navrženého systému je zobrazen v příloze práce.

2.11 Energetická náročnost systému

Energeticky nejnáročnější položku systému představuje topný člen o celkovém výkonu 80 W. Množství celkové energie spotřebované tímto členem závisí především na okolní teplotě systému. Jako energeticky náročná položka se může jevit membránové čerpadlo, jehož výkon činí 24 W. Pokud je čerpadlo spínané každých 5 minut na 5 sekund, činí to zhruba 24 minut provozního času na jeden den. Na jeden běžný měsíc to tedy činí 12 hodin. Během této doby spotřebuje čerpadlo 0,288 kWh elektrické energie, což lze v závěru považovat za minimální výdaj. Další energeticky náročnou položku představuje samotný mikropočítač Raspberry Pi, jenž je nepřetržitě napájen zdrojem o napětí 5 V s výstupním proudem 2,5 A. Proudový odběr mikropočítače je však závislý na jeho momentálním vytížení. Pokud se tedy dotykový displej nachází v režimu spánku, je proudový odběr této řídicí jednotky zhruba 900 mA.

2.12 Finanční zhodnocení systému

Již od začátku návrhu tohoto systému bylo dbáno na to, aby byla jeho výsledná cena co nejmenší. Proto byly zejména při konstrukční části systému voleny takové komponenty, které jsou běžně dostupné a finančně nenáročné. Větší část vstupní a výstupních periférií byla zakoupena na webovém portálu ebay.com. Mezi tyto zakoupené periferie se řadí zejména všechny použité senzory (pH sonda, čidlo teploty a vlhkosti, hladinové snímače aj.), akční členy (ultrazvukový mlhovač, čerpadla, elektromagnetické ventily) a moduly (A/D převodník, relé modul, MOSFET moduly). Finančně nejnáročnějším prvkem systému je řídicí jednotka v podobě mikropočítače Raspberry Pi, jehož cena činila přibližně 800 Kč.

Konstrukční část systému včetně osazených hydroponických košíčku s rockwoolovými kosatkami vyšla na cca 2700 Kč. Největší část této ceny byla tvořena euro přeprawkami a lexanovým poklopem. Pokud by tedy požadavek na uzavřený pěstební prostor nebyl nutný, je výsledná cena konstrukce systému bezmála o 600 Kč levnější. Jak již bylo řečeno, systém lze snadno rozšířit o další pěstební nádobu, přičemž by toto rozšíření obnášelo jednorázovou investici v hodnotě cca 500 Kč. Pokud by systém nebylo nutné automatizovat, stačilo by k navržené konstrukční části připojit pouze membránové čerpadlo řízené časovačem, čímž by byla zajištěna plná funkčnost aeroponického systému. Investice do tohoto membránového čerpadla činila cca 300 Kč a digitální časový spínač lze pořídit do 200 Kč.

Nejvíce se na celkové ceně systému podílely komponenty použité k jeho automatizaci. Celková cena materiálu zakoupeného k vytvoření tohoto automatizovaného aeroponického systému se pohybuje okolo 10 000 Kč. Ve výsledné ceně ovšem není zahrnut některý materiál použitý při výrobě (pájka, teflonová páska aj.) a celkový čas práce není taktéž naceněn. Při zohlednění těchto výdajů by se celková cena systému pohybovala kolem 12 500 Kč.

3 ZÁVĚR

Úvodní kapitoly práce se zabývají jednotlivými problémy klasického pěstování v půdě a možnými řešeními těchto problémů pomocí využití alternativních metod pěstování.

Dále je nastíněna problematika aeroponického a hydroponického pěstování spolu s jejich současným využitím. Pro každou tuto metodu jsou popsány principy funkce jednotlivých typů pěstebních systémů. Tyto systémy jsou následně porovnány z hlediska jejich výhod a nevýhod. Dále jsou stanoveny ideální podmínky při pěstování, mezi které se v těchto metodách řadí zejména udržování parametrů živného roztoku. V závěru této sekce je uvedený průzkum současné dostupnosti hydroponických a aeroponických systému na českém trhu.

Druhá část práce se zabývá již samotným návrhem a realizací vysokotlakého aeroponického systému a jeho řízení. Je zde znázorněno technologické schéma navrhovaného systému, dle kterého byl vytvořen reálný prototyp. Pro řízení systému musely být vybrány vhodné periferie a moduly, jejichž parametry a funkčnosti jsou uvedeny v samostatné podkapitole. Součástí podkapitoly zabývající se návrhem samostatného regulátoru pH a EC je i princip a problematika měření těchto parametrů. V této podkapitole je dále popsán návrh EC snímače a komunikace s výsledným regulátorem. Pro systém byl z hlediska co nejpřesnějšího udržování žádané teploty navržen PID, jenž byl programově implementován v podobě PSD regulátoru v paralelním tvaru se vzorkovací periodou 5 s. Dále jsou zde popsány dílčí procesy systému, které slouží k jeho automatizaci a popsány jednotlivá vývojová prostředí, v kterých byly procesy programově implementovány. Následně je v několika podkapitolách uveden popis vytvořeného uživatelského rozhraní pro ovládání systému. V závěru je celý systém zhodnocen z hlediska funkčnosti, chybovosti, energetické náročnosti a finančních výdajů.

Aeroponie se v dnešní době spolu s hydroponií řadí mezi jedny z nejprogresivnějších a nejúčinnějších metod pěstování. Bohužel kvůli malé konkurenci prodejců těchto systému je jejich cena poměrně vysoká a spolu s vysokými požadavky na údržbu systému se pěstitelé uchylují raději k běžným pěstebním metodám. Díky automatizaci těchto pěstebních systému jsou sníženy nároky na jejich údržbu, čímž je ušetřena práce i čas pěstitele, díky čemuž by mohl veřejný zájem o tyto systémy vrůst. Řídicí jednotku by bylo vhodné do budoucna doplnit o komunikaci s webovým serverem, který by umožňoval sběr a ukládání naměřených dat ze senzorů.

LITERATURA

- [1] Hydroponické pěstování na Moravě. *Česká televize ČT24* [online]. [cit. 2.05.2019]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2466073-na-breclavsku-rostou-rajcata-bez-pudy-staci-kokosova-vlakna-a-specialni-roztok>
- [2] Aeroponics Systems - Easy Guide To Growing With Aeroponics. *Smart Garden Guide - Making Gardening Easier* [online]. [cit. 3.05.2019]. Dostupné z: <https://smartgardenguide.com/aeroponics-systems-easy-guide/>
- [3] *AeroFarms* [online]. 2019 AeroFarms [cit. 2.05.2019]. Dostupné z: <https://aerofarms.com>
- [4] Progressive Plant Growing Has Business Blooming. *NASA Spinoff* [online]. [cit. 3.05.2019]. Dostupné z: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/er_2.html
- [5] 5 Research-Backed Benefits of Aeroponic Gardening. *Tower Garden: Grow Food with a Vertical, Aeroponic System* [online]. [cit. 3.05.2019]. Dostupné z: https://www.towergarden.com/blog.read.html/en/2015/4/5_research-backedbe.html
- [6] The Do's and Don'ts of Aeroponics. *Bifarm* [online]. [cit. 4.05.2019]. Dostupné z: <https://blog.bifarm.com/the-dos-and-don-ts-of-aeroponics-3770eeaaee199>
- [7] Optické záření | Velký lékařský slovník On-Line. *Velký lékařský slovník On-Line* [online]. Maxdorf 1998 [cit. 4.05.2019]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/opticke-zareni>
- [8] LED Lighting & Photosynthesis Guide. *Fluence Bioengineering | Commercial LED Grow Lights* [online]. Fluence Bioengineering, Inc. [cit. 4.05.2019]. Dostupné z: <https://fluence.science/science/photosynthesis-guide/>
- [9] Výživa rostlin. *Wikipedie* [online]. [cit. 4.05.2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Výživa_rostlin
- [10] Dissolved gas. *ESF / SUNY ESF / College of Environmental Science and Forestry* [online]. [cit. 4.05.2019]. Dostupné z: <https://www.esf.edu/efb/schulz/Limnology/Oxygen.html>

- [11] pH Control Kit. *Grow Lights & Hydroponics Supplies - Hydrobuilder.com* [online]. [cit. 4.05.2019]. Dostupné z: <https://hydrobuilder.com/general-hydroponics-ph-control-kit-722080.html>
- [12] Beneš, P., Havránek, Z., Klusáček, S a kol. *Návody do laboratorních cvičení BMFV*. VUT v Brně, FEKT, ÚAMT. Únor 2018, 152 s.
- [13] General Hydroponics AeroFlo 40. *HOTchilli.cz GROWshop* [online]. [cit. 5.05.2019]. Dostupné z: <https://www.hotchilli.cz/hydroponie/aeroflo-40/>
- [14] General Hydroponics AeroFarm 2". *HOTchilli.cz GROWshop* [online]. [cit. 5.05.2019]. Dostupné z: <https://www.hotchilli.cz/aero/aerofarm-2/>
- [15] ATAMI WILMA S 4 – 6L. *HOTchilli.cz GROWshop* [online]. [cit. 5.05.2019]. Dostupné z: <https://www.hotchilli.cz/atami-wilma/wilma-s-4---6l/>
- [16] Hydroponický systém NFT Multi Duct MD804. *HOTchilli.cz GROWshop* [online]. [cit. 5.05.2019]. Dostupné z: <https://www.hotchilli.cz/multi-duct/2-4m-multi-duct-244cm-x-94cm-x-6-5cm-x-4/>
- [17] Bluelab pH Controller CONNECT. *HOTchilli.cz GROWshop* [online]. [cit. 5.05.2019]. Dostupné z: <https://www.hotchilli.cz/mereni/bluelab-ph-controller-connect/>
- [18] GroControl. *Cloudponics* [online]. [cit. 5.05.2019]. Dostupné z: <https://cloudponics.com/collections/grocontrol/products/grocontrol>
- [19] Měření pH. *WikiSkripta* [online]. [cit. 10.05.2019]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Měření_pH
- [20] Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik. *Vysoká škola báňská* [online]. [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/Identifikace/str/metody.htm>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Pasivní systém (Kratky).....	3
Obrázek 1.2: Knotový systém.....	4
Obrázek 1.3: Systém DWC.....	5
Obrázek 1.4: Systém Ebb&Flow	6
Obrázek 1.5: Drip systém.....	7
Obrázek 1.6: NFT systém	8
Obrázek 1.7: Hydroponické skleníky na Moravě[1]	9
Obrázek 1.8: LPA systém.....	11
Obrázek 1.9: HPA systém	12
Obrázek 1.10: Aeroponický ultrazvukový systém.....	13
Obrázek 1.11: Výrobní hala osazená aeroponickými systémy [3]	14
Obrázek 1.12: Nafukovací aeroponický systém pro vesmírné použití [4]	14
Obrázek 1.13: Srovnání rostlin pěstovaných pomocí různých metod [6]	16
Obrázek 1.14: Fotosynteticky aktivní záření [8].....	17
Obrázek 1.15: Závislost rozpustnosti kyslíku na teplotě vody [10]	19
Obrázek 1.16: Dostupnost živin vzhledem k hodnotě pH [11].....	20
Obrázek 1.17: Vodivosti roztoků [12].....	21
Obrázek 1.18: AeroFlo 40 [13].....	23
Obrázek 1.19: AeroFarm 2" [14]	23
Obrázek 1.20: Wilma S 4 - 6L [15].....	24
Obrázek 1.21: Multi Duct MD804 [16]	24
Obrázek 1.22: BlueLab pH Controller [17].....	25
Obrázek 1.23: GroControl [18].....	25
Obrázek 2.1: Technologické schéma aeroponického systému	27
Obrázek 2.2: Raspberry Pi 3 Model B.....	29
Obrázek 2.3: Blokové komunikační schéma	30
Obrázek 2.4: Membránové čerpadlo.....	31
Obrázek 2.5: Ponorné čerpadlo	32
Obrázek 2.6: Elektromagnetický ventil	33
Obrázek 2.7: Snímač hladiny YD044-SZ	34
Obrázek 2.8: Čidlo DHT21	35
Obrázek 2.9: Topný člen.....	36
Obrázek 2.10: Zvhčovač vzduchu.....	37
Obrázek 2.11: pH sonda.....	38
Obrázek 2.12: Převodník pH sondy.....	38
Obrázek 2.13: Peristaltické čerpadla.....	39
Obrázek 2.14: MOSFET PWM modul IRF520	40

Obrázek 2.15: Průtokoměry YF-S401.....	40
Obrázek 2.16: Relé modul.....	41
Obrázek 2.17: MOSFET PWM modul.....	42
Obrázek 2.18: Dotyková obrazovka.....	42
Obrázek 2.19: Prototyp EC snímače.....	47
Obrázek 2.20: Zapojení snímače EC.....	47
Obrázek 2.21: Ukázka komunikace mezi regulátorem a řídicí jednotkou.....	49
Obrázek 2.22: Naměřené odezvy systému.....	50
Obrázek 2.23: Normalizované odezvy systému.....	51
Obrázek 2.24: Přechodová charakteristika s aperiodickým průběhem a s vyznačenou dobou náběhu a dobou průtahu [20].....	52
Obrázek 2.25: Aproximace proporcionální soustavou 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami [20].....	53
Obrázek 2.26: Závislost parametru τ_2 na hodnotě přechodové charakteristiky v časovém okamžiku t_2	54
Obrázek 2.27: Srovnání získané aproximace a jednotlivých odezev.....	56
Obrázek 2.28: Přechodová charakteristika přenosu řízení.....	57
Obrázek 2.29: Přechodová charakteristika přenosu poruchy.....	58
Obrázek 2.30: Struktura komunikačního protokolu Single-bus pro čidlo DHT21 ..	59
Obrázek 2.31: Ukázka kódu dvoustavové regulace s hysterezí.....	60
Obrázek 2.32: Schéma použitých uživatelských knihoven.....	62
Obrázek 2.33: Schéma použitých knihoven v Arduino IDE.....	63
Obrázek 2.34: Úvodní obrazovka.....	64
Obrázek 2.35: Sekce stav systému.....	65
Obrázek 2.36: Sekce historie hodnot.....	66
Obrázek 2.37: Sekce nastavení.....	67

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Srovnání hydroponických a aeroponických systémů	15
Tabulka 1.2: Srovnání aeroponické metody oproti běžnému půdnímu pěstování. 16	
Tabulka 2.1: Parametry membránového čerpadla (Převzato ze štítku)	31
Tabulka 2.2: Parametry ponorného čerpadla (Převzato ze štítku)	32
Tabulka 2.3: Parametry elektromagnetického ventilu (Převzato ze štítku)	33
Tabulka 2.4: Parametry snímače hladiny YD044-SZ (Převzato ze štítku)	34
Tabulka 2.5: Parametry čidla DHT21 (Převzato ze štítku)	35
Tabulka 2.6: Parametry topného členu (Převzato ze štítků)	36
Tabulka 2.7: Parametry zvlhčovače vzduchu (Převzato ze štítků)	37
Tabulka 2.8: Parametry pH sondy (Převzato ze štítku)	38
Tabulka 2.9: Parametry teplotního čidla DS18B20	38
Tabulka 2.15: Parametry A/D převodníku MCP3424 (Převzato ze štítku).....	39
Tabulka 2.12: Parametry peristaltického čerpadla (Převzato ze štítku)	39
Tabulka 2.11: Parametry MOSFET PWM modulu IRF520 (Převzato ze štítku)	40
Tabulka 2.10: Parametry průtokoměru YF-S401 (Převzato ze štítku)	40
Tabulka 2.13: Parametry modulu s relé (Převzato ze štítku).....	41
Tabulka 2.14: Parametry MOSFET PWM modulu (Převzato ze štítku)	42
Tabulka 2.16: Parametry dotykové obrazovky (Převzato ze štítku)	42
Tabulka 2.17: Zjištěné parametry pro jednotlivé odezvy.....	55
Tabulka 2.18: Časové konstanty a výsledné přenosy jednotlivých odezev.....	55

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně
UART	-	Universal Asynchronous Receiver Transiever
I ² C	-	Inter-Integrated Circuit
A/D	-	Analog/Digital
EC	-	Electrical conductivity
S	-	Siemens (Jednotka elektrické vodivosti)
PWM	-	Pulse Width Modulation
IO	-	Input Output
DI	-	Digital input
AI	-	Analog input
DO	-	Digital output
rel.	-	Relativní
el. mag.	-	Elektromagnetický

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Funkční prototyp navrženého aeroponického systému

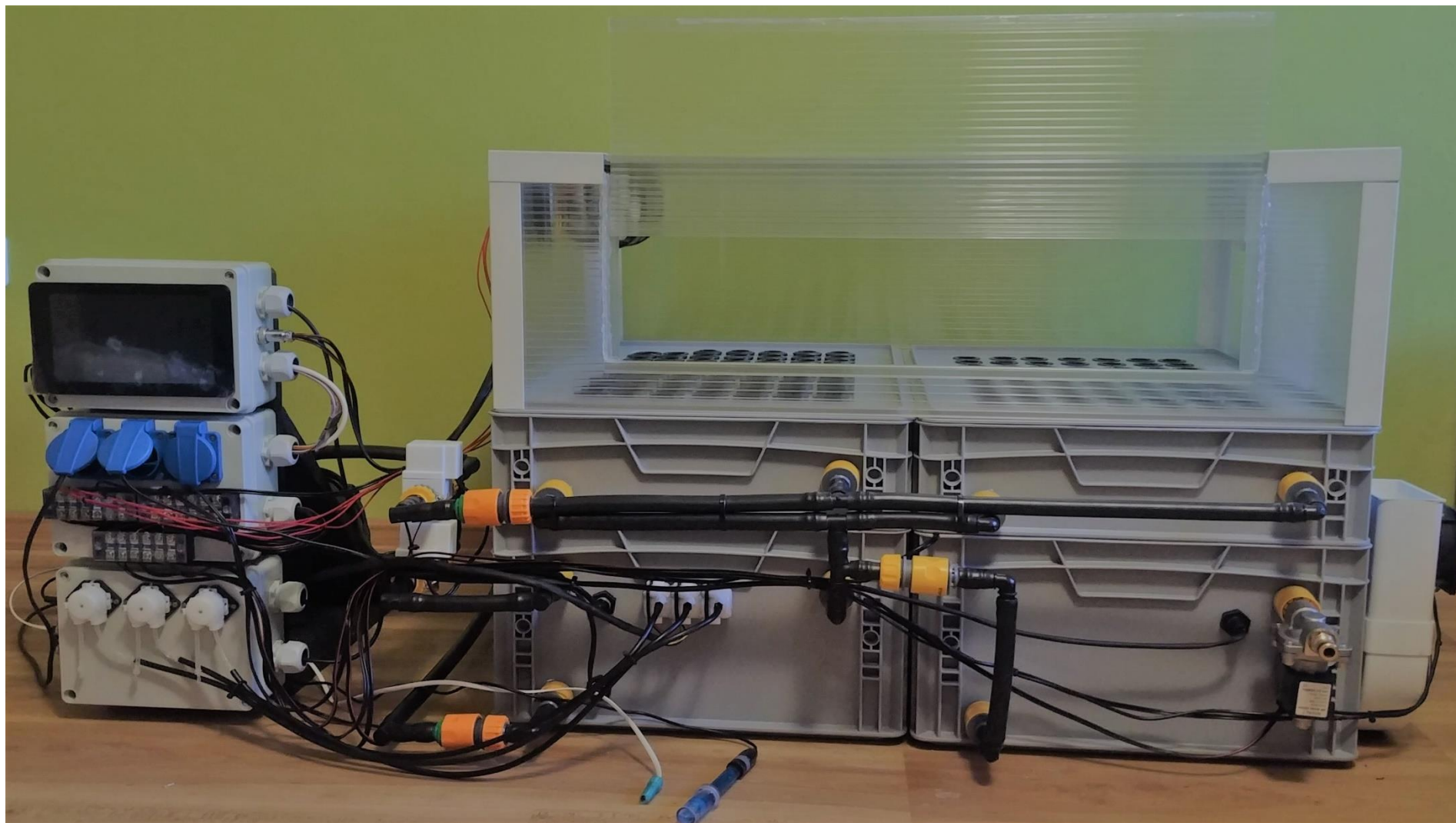
Příloha 2. Tabulka vstupů a výstupů

Příloha 3. Vývojový diagram programu regulátoru pH a EC

Příloha 4. Programu z řídicí jednotky na CD

Příloha 5. Programu z regulátoru pH a EC na CD

Příloha 1. Funkční prototyp navrženého aeroponického systém



Příloha 2. Tabulka vstupů a výstupů

Vstupy				
Označení	Zařízení	Použití	Jednotka	Pin
T1	Teplotní čidlo	Venkovní teplota	Raspberry Pi	7
T2	Teplotní čidlo	Vnitřní teplota	Raspberry Pi	8
T3	Teplotní čidlo	Teplota roztoku	Arduino	10
V1	Čidlo vlhkosti	Venkovní vlhkost	Raspberry Pi	7
V2	Čidlo vlhkosti	Vnitřní vlhkost	Raspberry Pi	8
pH	pH sonda	pH roztoku	Arduino	A0
EC	EC sonda + A/D převodník	Konduktivita roztoku	Arduino	SDA, SCL
PS1	Plovákový spínač	Horní hladina nádrže s roztokem	Raspberry Pi	11
PS2	Plovákový spínač	Spodní hladina nádrže s roztokem	Raspberry Pi	13
PS3	Plovákový spínač	Horní hladina nádrže s vodou	Raspberry Pi	15
C1	Průtokoměr	Průtok čerpadla P3	Arduino	INT1
C2	Průtokoměr	Průtok čerpadla P4	Arduino	INT2
C3	Průtokoměr	Průtok čerpadla P5	Arduino	INT3

Výstupy					
Označení	Zařízení	Použití	Jednotka	Pin	Řízení
P1	Membránové čerpadlo	Rozprašování a cirkulace roztoku	Raspberry Pi	37	Relé
P2	Čerpadlo	Přečerpávání vody	Raspberry Pi	40	Relé
P3	Peristaltické čerpadlo	Dávkování pH+	Arduino	8	MOSFET
P4	Peristaltické čerpadlo	Dávkování pH-	Arduino	9	MOSFET
P5	Peristaltické čerpadlo	Dávkování minerálního hnojiva	Arduino	10	MOSFET
EV1	Elektroventil	Přívod vody	Raspberry Pi	35	Relé
EV2	Elektroventil	Rozprašovací sekce	Raspberry Pi	33	Relé
EV3	Elektroventil	Cirkulace roztoku	Raspberry Pi	36	Relé
T	Topení	Ohřev pěstební části systému	Raspberry Pi	18	MOSFET
V1	Ventilátor	Součást zvlhčovače	Raspberry Pi	31	Relé
V2	Ventilátor	Součást topného členu	Raspberry Pi	32	Relé
UM	Ultrazvukový mlhovač	Zvlhčení pěstební části	Raspberry Pi	38	Relé

Příloha 3. Vývojový diagram programu regulátoru pH a EC

